Молчило Ирвић

JOVAN M. NAHMAN

UZEMLJENJE NEUTRALNE TAČKE DISTRIBUTIVNIH MREŽA

Naučna knjiga
BEOGRAD, 1980.

Recenzenti:
MIHAILO GOLUBOVIĆ, prof.
MIODRAG CVETKOVIĆ, doc.

Izdavanje ove knjige pomogla je Poslovna zajednica Elektrodistribucije SR Srbije — Beograd, sa svojim članicama: Radna organizacija „Elektrodistribucija" — Kraljevo, Radna organizacija za distribuciju električne energije „Elektromorava" — Požarevac, Preduzeće elektrodistribucija „24. septembar" — Titovo Užice, Elektroprivredno preduzeće za distribuciju električne energije „Elektrotimok" — Zaječar, Preduzeće „Elektrodistribucija" — Niš, Radna organizacija „Elektrodistribucija — Beograd" — Beograd, Radna organizacija „Elektrošumadija" — Kragujevac, preduzeće za distribuciju električne energije „Elektrodistribucija" — Leskovac, Preduzeće za distribuciju električne energije „Elektrodistribucija" — Vranje, Radna organizacija „Elektrodistribucija — Vojvodina" — Novi Sad, Radna organizacija „Elektroizgradnja — Vojvodina" — Novi Sad, Elektroprivredno preduzeće „Elektrokosovo" — Priština, Radna organizacija „Beogradelektro — Beograd

Rešenjem Univerziteta u Beogradu br. 06-783/1 od 23. aprila 1980. štampano kao stalni univerzitetski udžbenik

Za izdavača *Dragoslav Joković*, urednik *Božica Vidanović*, tehnički urednik *Mihailo Jozić*, korektor *Marina Nikolić-Dobrić*
Tiraž 2.000 primeraka

Štampa Beogradski izdavačko-grafički zavod, Beograd, Bulevar vojvode Mišića 17

SADRŽAJ

Strana

UVOD 9

1. STRUJE I NAPONI KOD ZEMLJOSPOJEVA 13

1.1. JEDNOFAZNI ZEMLJOSPOJ 13
1.1.1. *Opšti izrazi*; 1.1.2. *Talasni izrazi* (Naponski talasi; strujni talasi); 1.1.3. *Stacionarno stanje*; 1.1.4. *Povratni napon*;

1.2. DVOFAZNI ZEMLJOSPOJ 33
1.2.1. *Opšti izrazi za struje i napone*; 1.2.2. *Stacionarne vrednosti*

1.3. DVOSTRUKI ZEMLJOSPOJ 41
1.3.1. *Opšti izrazi za struje kvara*; 1.3.2. *Stacionarne vrednosti struja kvara*

2. NAPON NEUTRALNE TAČKE U NORMALNOM RADU 48

3. MREŽA SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM 53

3.1. STACIONARNE VREDNOSTI NAPONA I STRUJA PRI JEDNOFAZNOM ZEMLJOSPOJU 53

3.2. SAMOGAŠENJE JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA 57
3.2.1. *Mesto i uzrok kvara*; 3.2.2. *Povratni napon*; 3.2.3. *Uprošćena fizička slika pojava posle gašenja struje zemljospoja*; 3.2.4. *Granične struje samogašenja*

3.3. PRELAZNI PRENAPONI KOD ZEMLJOSPOJA 69
3.3.1. *Vremenski tok napona*; 3.3.2. *Maksimalne vrednosti napona*; 3.3.3. *Uprošćeno fizičko tumačenje prenaponskih pojava pri nastanku zemljospoja*; 3.3.4. *Prenaponi na krajevima dužih vodova*

3.4. INTERMITENTNI PRENAPONI 80
3.4.1. *Teorija Petersena*; 3.4.2. *Teorija Petersa i Slipijana*; 3.4.3. *Intermitentni prenaponi u pogonskim uslovima*

3.5. PRENAPONI PRI ISKLJUČIVANJU ZEMLJOSPOJEVA 86
3.5.1 *Prekidanje kapacitivnih struja*; 3.5.2. *Uticaj karakteristika prekidača*; 3.5.3. *Prekidanje struje zemljospoja*

3.6. UGROŽENOST MREŽA OD PRENAPONA 95
3.6.1. *Ocena visine prenapona i izdržljivosti izolacije*; 3.6.2. *Izbor ventilnih odvodnika prenapona*

3.7. TOPLOTNI UTICAJI STRUJE JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA 104
3.7.1. *Prelazak zemljospoja u međufazni kratki spoj*; 3.7.2. *Zagrevanje kabla u radu sa zemljospojem*

Strana

3.8. POJAVA DVOSTRUKIH ZEMLJOSPOJEVA 108

3.8.1. *Uticaji na mrežu*; 3.8.2. *Verovatnoća nastanka*; 3.8.3. *Verovatnoća zemljospoja sa jednim kvarom u TS-srednji/niski napon*; 3.8.4. *Granične dužine mreža*

4. MREŽE SA KOMPENZACIJOM STRUJE JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA : 115

4.1. STACIONARNE VREDNOSTI NAPONA I STRUJA PRI JEDNOFAZNOM ZEMLJOSPOJU 115

4.1.1. *Osnovni harmonici napona i struja*; 4.1.2. *Napon u neutralnoj tački u normalnom pogonu*; 4.1.3. *Viši harmonici u struji jednofaznog zemljospoja*

4.2. PRELAZNE POJAVE PRI NASTANKU JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA 127

4.3. GAŠENJE STRUJE JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA I POVRATNI NAPON .. 131

4.4. PRENAPONI PRI KOMUTACIJAMA U MREŽI 134

4.4.1. *Prekidanje kola sa induktivnostima*; 4.4.2. *Prekidanje struja zemljospoja*

4.5. KOMPENZACIONE PRIGUŠNICE 140

5. UZEMLJENJE PREKO MALE IMPEDANSE 146

5.1. STACIONARNE VREDNOSTI STRUJA I NAPONA PRI JEDNOFAZNOM ZEMLJOSPOJU 146

5.1.1. *Impedanse mreže za α i 0 redosled*; 5.1.2. *Struja jednofaznog zemljospoja*; 5.1.3. *Naponi ispravnih faza*

5.2. PRELAZNI PRENAPONI PRI NASTANKU JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA 152

5.2.1. *Karakteristični parametri*; 5.2.2. *Analiza na tranzijentnim modelima*; 5.2.3. *Eksperimenti u mreži*

5.3. IZBOR IMPEDANSE UZEMLJENJA SA STANOVIŠTA PRENAPONA 164

5.4. OTPORNICI ZA UZEMLJENJE 166

5.4.1. *Osnovne karakteristike*; 5.4.2. *Nazivne veličine i konstruktivne karakteristike*; 5.4.3. *Poređenje, prednosti i nedostaci*

5.5. TRANSFORMATORI ZA UZEMLJENJE I PRIGUŠNICE 173

5.5.1. *Potrebna snaga transformatora kod trajnog rada sa zemljospojem*; 5.5.2. *Instalisana snaga za kratkotrajni pogon*; 5.5.3. *Kombinovano opterećenje*; 5.5.4. *Prigušnica za uzemljenje*

5.6. OPASNI UTICAJI NA TELEKOMUNIKACIONE VODOVE 185

5.6.1. *Naponi na provodnicima telekomunikacija pri paralelnom vođenju sa elektroenergetskim vodom*; 5.6.2. *Redukcioni faktor*; 5.6.3. *Redukcioni faktor kablova sa armaturom*; 5.6.4. *Napon na provodniku telekomunikacionog voda pod uticajem uzemljenja elektroenergetskih postrojenja*

6. UZEMLJENJE I UZEMLJIVAČI 203

6.1. KARAKTERISTIČNE VELIČINE UZEMLJIVAČA 203

6.2. KRITERIJUMI OPASNOSTI OD ELEKTRIČNOG UDARA 206

Strana

6.3. VAZDUŠNI VOD KAO ELEMENT SISTEMA UZEMLJENJA 210

6.3.1. *Naponi i struje na zaštitnom provodniku*; 6.3.2. *Približni izraz za* $\underline{Z}_n$ *i* k_i (Dugi vodovi; Kratki vodovi)

6.4. KABLOVI U SISTEMU UZEMLJENJA 217

6.4.1. *Kablovi sa provodnim spoljnim omotačem* (Struje i naponi na plaštu; Izlazeći potencijal i impedansa uzemljenja; Eksperimentalni rezultati); 6.4.2. *Kablovi sa izolovanim metalnim plaštom*

6.5. TRANSFORMATORSKE STANICE VISOKI/SREDNJI NAPON 230

6.5.1. *Raspodela struja u sistemu uzemljenja*; 6.5.2. *Proračun karakterističnih veličina*; 6.5.3. *Kablovi kao elementi uzemljivača*; 6.5.4. *Kriterijumi za dimenzionisanje uzemljivača* (Naponi koraka i dodira; Izlazeći potencijal; Galvansko odvajanje uzemljenja)

6.6. DIMENZIONISANJE UZEMLJENJA POSTROJENJA PREMA KVAROVIMA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI 249

6.6.1. *Struje i naponi u sistemu uzemljenja*; 6.6.2. *Mreža sa izolovanom neutralnom tačkom*; 6.6.3. *Kompenzovana mreža*; 6.6.4. *Mreže uzemljene preko male impedanse*

6.7. UZEMLJENJE TS-SREDNJI/NISKI NAPON 255

6.7.1. *Izolovana ili kompenzovana mreža* (Jednofazni zemljospojevi se ne otklanjaju brzo; Jednofazni zemljospojevi se brzo otklanjaju); 6.7.2. *Mreža uzemljena preko male impedanse*; 6.7.3. *Uzemljivači TS-srednji/niski napon* (Pravougaoni uzemljivači; Prstenasti uzemljivači; Eksperimentalni podaci)

6.8. UZEMLJENJE STUBOVA VAZDUŠNIH VODOVA 275

6.8.1. *Verovatnoća sticaja uslova u pogledu opasnih napona*; 6.8.2. *Karakteristike uzemljenja stubova*; 6.8.3. *Uticaj zaštitnog provodnika*; 6.8.4 *Izbor i dimenzionisanje uzemljivača*

7. RELEJNA ZAŠTITA, SIGNALIZACIJA I AUTOMATIKA 290

7.1. KARAKTERISTIČNE VELIČINE MREŽE 290

7.2. PRELAZNA OTPORNOST NA MESTU KVARA 292

7.3. MERENJE NULTIH KOMPONENTI NAPONA I STRUJA 296

7.3.1. *Merenje nultih komponenti napona*; 7.3.2. *Merenje nultih komponenti struja*

7.4. MREŽE SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM 301

7.4.1. *Karakteristične veličine*; 7.4.2. *Neselektivna signalizacija*; 7.4.3. *Načini otkrivanja mesta jednofaznih zemljospojeva* (Otkrivanje mesta zemljospoja na osnovu vrednosti nultih komponenti struja; — na osnovu smera reaktivnih snaga; — poređenjem polariteta napona i struja u prelaznom procesu); 7.4.4. *Izbor signalizacije i zaštite*

7.5. KOMPENZOVANA MREŽA 310

7.5.1. *Karakteristične veličine*; 7.5.2. *Signalizacija i zaštita* (Otkrivanje mesta kvara prema smeru aktivnih snaga; — prema struji prigušnice u prelaznom procesu; — na osnovu viših harmonika struje; Kratkotrajno premošćenje prigušnice malom impedansom)

7.6. MREŽA UZEMLJENA PREKO MALE IMPEDANSE 316

7.6.1. *Karakteristične veličine mreže pri zemljospoju*; 7.6.2. *Vrste zaštite od zemljospoja* (Prekostrujna zaštita koja reaguje na nulte komponente struja; — na fazne struje; Automatsko ponovno uključenje i zemljospojni prekidač); 7.6.3. *Zemljospojna zaštita u izvornoj TS* (Zaštita sabirnica; Zaštita impedanse za uzemljenje; Posebna zaštita od jednofaznih zemljospojeva sa velikom prelaznom otpornošću)

Strana

8. STATISTIČKI PODACI O KVAROVIMA U RAZLIČITO UZEMLJENIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA 329

9. UTICAJ NAČINA UZEMLJENJA NEUTRALNE TAČKE NA POUZDANOST I EKONOMIČNOST MREŽE 343

9.1. UČESTANOST I STRUKTURA KVAROVA 343

9.2. KABLOVSKE MREŽE 346

9.2.1. *Verovatno neisporučena energija usled zemljospojeva* (Mreže sa izolovanom neutralnom tačkom; Kompenzovane mreže; Mreže uzemljene preko male impedanse); 9.2.2. *Eksploatacioni i investicioni troškovi*; 9.2.3. *Ukupni troškovi*

9.3. VAZDUŠNE MREŽE 357

10. PRAKSA RAZLIČITIH ZEMALJA U OBLASTI UZEMLJENJA NEUTRALNE TAČKE 360

10.1. DR NEMAČKA 360

10.2. ENGLESKA 361

10.3. FRANCUSKA 363

10.4. SAD 367

10.5. SR NEMAČKA 369

10.6. SSSR 372

10.7. SFR JUGOSLAVIJA 376

11. IZBOR NAČINA UZEMLJENJA NEUTRALNE TAČKE 380

11.1. PREGLED KARAKTERISTIKA RAZLIČITIH NAČINA UZEMLJENJA I POREĐENJE 380

(Izolovana neutralna tačka; Kompenzovane mreže; Uzemljenje preko male impedanse; Direktno uzemljenje)

11.2. OBLASTI PRIMENE 383

11.3. RAZVOJ U BUDUĆNOSTI 386

PRILOZI 388

I. LAPLASOVA TRANSFORMACIJA 388

I.1. *Definicija i osnovna svojstva*; I.2. *Granične teoreme*; I.3. *Inverzija Laplasove transformacije*; I.4. *Primena*; *Literatura*

II. KOMPONENTNE α, β, 0 VELIČINA TROFAZNIH ELEKTRIČNIH MREŽA .. 399

II.1. *Opšte jednačine elemenata mreže*; II.2. *Nesimetrični režimi*; *Literatura*

III. PODACI O ELEMENTIMA MREŽE 404

III.1. *Zamenske šeme transformatora*; III.2. *Električni parametri vodova* (III.2.1. Kablovski vodovi; III.2.2. Vazdušni vodovi)

LITERATURA 411

PREDGOVOR

Knjiga obrađuje problematiku uzemljenja neutralne tačke distributivnih mreža nazivnih napona 10 do 110 kV, obuhvatajući analizu prelaznih i stacionarnih pojava u mrežama u poremećenim stanjima, kriterijume i način izbora različitih vrsta uzemljenja neutralne tačke, relejne zaštite, automatike i manipulacione tehnike, kao i koncepciju i proračun sistema uzemljenja postrojenja i mreže sa naročitim osvrtom na uslove u urbanim sredinama. Posebna poglavlja posvećena su pitanjima predviđanja kvarova i procenama tehničko-ekonomskih karakteristika postojećih rešenja u različitim uslovima, uz uvažavanje šteta usled neisporučene energije i troškova opravki i adaptacija postrojenja. Izlaganja su ilustrovana u celom tekstu računskim primerima kako bi se dobila predstava o redu vrednosti pojedinih veličina i parametara koja je vrlo važna za praktičnu orijentaciju inženjera.

Ovako složena materija obrađena je na osnovu poznavanja postojećih i planiranih tehničkih rešenja, kao i eksperimentalnih rezultata i pogonskih iskustava u inostranstvu i u našoj zemlji, pri tome, u znatnoj meri i na osnovu višegodišnjih studijskih i eksperimentalnih istraživanja na distributivnim mrežama i postrojenjima Beograda u kojima je autor učestvovao. Deo rezultata ovih istraživanja, koji se odnose na mreže 10 i 0,4 kV, sadržan je u dve obimne studije koje je Elektrotehnički fakultet u Beogradu uradio za potrebe »Elektrodistribucije-Beograd«. Ova knjiga imala je za cilj, prema prvoj zamisli autora, da široj stručnoj javnosti stavi na raspolaganje osnovne rezultate pomenutih studija, no zbog želje da se analize uopšte na sve distributivne naponske nivoe, da se izlaganje dopuni rezultatima postignutim u periodu posle završetka navedenih studija, kao i da se pojedine oblasti detaljnije obrade nego što je to bilo moguće ranije, proizašao je sasvim novi tekst koji će u ovom obliku, kako se autor nada, moći bolje da odgovori interesovanjima čitalaca.

Rukopis je namenjen stručnjacima koji se bave projektovanjem i eksploatacijom distributivnih mreža i postrojenja ali su pojedina njegova poglavlja i od šireg značaja. Delovi izložene materije koristiće slušaocima postdiplomskih studija na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu iz oblasti postrojenja visokog napona, distributivnih sistema, relejne zaštite, prelaznih procesa u elektroenergetskim sistemima, tehnike visokog napona i električne opreme.

Poglavlja koja obrađuju uzemljenje i pojave pri zemljospojevima moći će takođe poslužiti i studentima diplomske nastave radi boljeg praćenja materije koja se izlaže u okviru predmeta Elektrane i razvodna postrojenja i pojedinih drugih predmeta.

Rukopis je proizašao iz saradnje autora sa mnogim stručnjacima distributivnih radnih organizacija, fakulteta i instituta na problematici uzemljenja neutralne tačke i uzemljenja uopšte i može se shvatiti kao autorov prilog i podstrek daljem radu na ovim zadacima. U tom duhu autor se i obraća čitaocima molbom da svojim primedbama, predlozima i željama pomognu da u eventualnim novim izdanjima ova knjiga potpunije odgovori svojoj nameni.

Autor želi da se zahvali Poslovnoj zajednici Elektrodistribucije SR Srbije koja je pomogla izdavanje ove knjige, a posebno, lično M. Kremiću, dipl. inž., njenom direktoru i M. Krasavcu, dipl. inž., direktoru „Elektrodistribucije — Beograd," za razumevanje i podršku. Autor takođe koristi priliku da iskaže priznanje i zahvalnost T. Bojkoviću, dipl. inž., savetniku Poslovne zajednice, za svesrdnu podršku i zauzimanje oko izdavanja ove knjige, kao i dugogodišnju saradnju na pitanjima koje knjiga obrađuje. Recenzentima prof. M. Golubovića i doc. M. Cvetkovića autor duguje zahvalnost za uloženi trud i korisne sugestije.

Autor

UVOD

Način uzemljenja neutralne tačke umnogome utiče na uslove rada mreže, vrstu i cenu ugrađene opreme, izbor oblika mreže i zaštite i automatike.

Kod mreža najviših nazivnih napona, reda 110 kV i više, investiciona ulaganja jako zavise od stupnja izolacije koju treba da ima ugrađena oprema. Ovaj je stupanj osetno uslovljen visinom unutarnjih prenapona koji se mogu očekivati pri poremećajima u mreži. Posebno su značajni prenaponi kod nastanka i isključenja jednofaznih i drugih zemljospojeva, koji dovode do povišenih naprezanja izolacije faznih provodnika prema zemlji. Mreže najviših napona rade po pravilu kao petljaste i višestruko napajane da bi se obezbedilo dobro uključivanje elektrana i povoljan rad generatora i elektroenergetskog sistema u celini. Zbog ovakve konfiguracije mreže može se po pravilu obezbediti nesmetano napajanje prijemnih, potrošačkih transformatorskih stanica pri isključivanju spojeva sa zemljom. Budući da su potrošači na niskom naponu u električnom pogledu najčešće udaljeni od postrojenja mreža najviših napona, eventualne velike vrednosti struja jednofaznih zemljospojeva neće po pravilu stvarati teškoće u pogledu opasnosti od električnog udara. Navedene karakteristike mreža najviših napona uslovile su, kao opšte prihvaćeno rešenje, direktno uzemljenje neutralne tačke. Ovakvim se rešenjem maksimalno ograničavaju naponi faza i neutralne tačke prema zemlji a zadržava se potrebna pouzdanost napajanja potrošača i bezbednost pogona.

Kod mreža srednjih nazivnih napona, koje se koriste za distribuciju električne energije, uslovi su znatno složeniji pošto treba uvažiti veliki broj različitih činilaca od približno jednake važnosti koji se svi ne mogu zadovoljiti ni jednim od mogućih rešenja. Uštede koje bi se mogle ostvariti snižavanjem izolacionih nivoa kod mreža srednjih napona, 6 do 35 kV nisu velike. Objekti pomenutih mreža često su u bliskom kontaktu sa instalacijama telekomunikacija, vodovoda, toplovodne mreže, armirano-betonskim konstrukcijama temelja zgrada i drugim instalacijama i objektima tako da se mora voditi posebna briga o opasnostima i smetnjama koje mogu proizvesti struje i naponi kod zemljospojeva. Ovo ukazuje na potrebu preuzimanja posebnih mera zaštite a i ograničenja vrednosti struja zemljospoja i njihovog trajanja. U distributivnim mrežama se često, iz ekonomskih razloga, ne može obezbediti potpuno rezerviranje potrošača u slučaju isključenja neispravnih vodova, a veliki su i troškovi otkrivanja i opravke kvara, naročito kod gradskih mreža. Iz navedenih razloga teži se smanjenju broja isključenja a i kvarova uopšte i uvođenju zaštite i automatike za brzo otkrivanje mesta kvara. S obzirom na veliki broj objekata u distributivnim mrežama i složene uslove na trasi usled prisustva drugih instalacija, često se ipak prednost daje jednostavnim i pouzdanim rešenjima pa makar po cenu

neobezbeđivanja potpunog automatskog rezerviranja i kontinualnog napajanja pojedinih potrošača. Isti se takvi zahtevi postavljaju i u odnosu na manipulacionu tehniku koju personal primenjuje kod traženja mesta kvara, prebacivanja na rezervno napajanje, kod opravki i remonta.

Navedeni složeni uslovi rada distributivnih mreža mogu se u manjoj ili većoj meri zadovoljiti različitim načinima uzemljenja neutralne tačke i dopunskim tehničkim rešenjima. Način uzemljenja bira se prema konkretnim specifičnostima određene mreže kako bi se zadovoljili svi neophodni tehnički kriterijumi za normalan i bezbedan pogon, a na osnovu raspoloživih kadrova i sredstava. Pri opredeljivanju između više tehnički zadovoljavajućih rešenja često su odlučujući postojeće iskustvo, tradicija i navike. Objektivna procena svih mana i prednosti pojedinih rešenja preko ukupnih troškova u veku eksploatacije, uz uvažavanje šteta usled poremećaja u isporuci električne energije, može da pomogne u izboru najpovoljnijeg rešenja. U mnogim slučajevima kao približno jednako dobra pokazaće se dva ili više načina uzemljenja. Dobro poznavanje osobenosti svakog od njih moći će da olakša izbor.

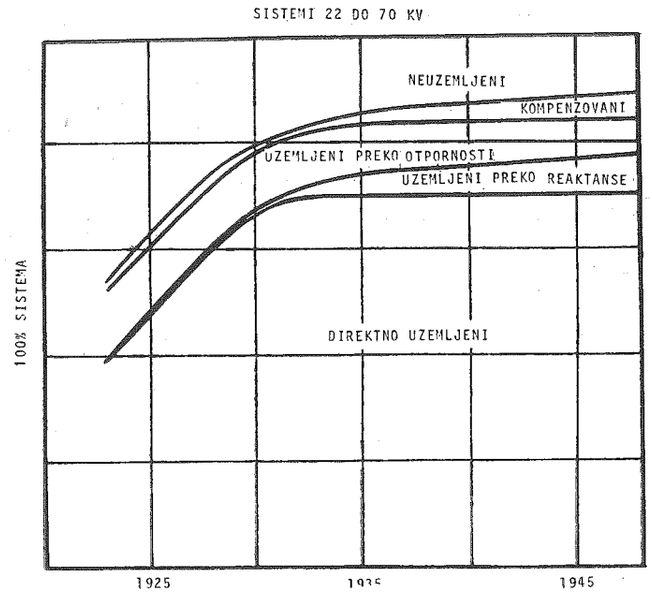
Prve električne mreže, istorijski posmatrano, radile su izolovano od zemlje. Od ovog rešenja se u Nemačkoj prvi put odstupilo početkom poslednje decenije 19. veka kada je uzemljena jednofazna mreža 3 kV u Frankfurtu na Majni. Mreža je bila izvedena od kablova sa koncentričnim provodnicima a uzemljen je spoljni provodnik. Uzemljenje je bilo izvedeno preko vodenog otpornika 3 Ω radi ograničenja prenapona do kojih je dolazilo pri kvarovima na kablu [44, 32]. Jednofazna mreža je docnije, kod porasta opterećenja, po savetu profesora Petersena (Petersen), pretvorena u trofaznu četvorožičnu spajanjem faza 3 kV u zvezdu. Dobijena mreža 5,2 kV imala je pored tri fazna provodnika i četvrti, vezan za neutralnu tačku. Da bi se omogućilo uključenje transformatora 30/5 kV sprege Yd5 u napajanje mreže 5 kV sa monofaznim vodovima, njihova je neutralna tačka na strani 5 kV uzemljena posredstvom transformatora za uzemljenje sa ukupnom reaktansom od 4 Ω. Ovakvo uzemljenje mreže 5 kV zadržano je vrlo dugo [32].

Opisano rešenje nije bilo opšte prihvaćeno u Nemačkoj zbog bojazni od opasnih napona koji se mogu pojaviti pri odvođenju velikih struja preko tla, kao i uticaja na telegrafsko-telefonske linije, budući da je sve privilegije u korišćenju zemlje kao povratnog provodnika imala pošta.

U želji da se izbegnu prenaponi kod nestabilnih jednofaznih zemljospojeva i olakšaju uslovi za samogašenje električnog luka na mestu kvara, profesor Petersen je 1917. godine predložio uzemljenje neutralne tačke preko prigušnice podešene tako da se kompenzuje kapacitivna struja mreže i radikalno smanji struja kroz mesto kvara. Budući da je ovakvo rešenje omogućilo nesmetan rad mreža većih prostranosti, a ujedno zadovoljavalo sve zahteve za ograničavanjem struja kroz zemlju, ono je brzo prihvaćeno kao najpovoljnije rešenje ne samo u Nemačkoj već i u dobrom delu Evrope. Pomenuto rešenje prihvatile su, na primer, Austrija, Švajcarska, zemlje Skandinavskog poluostrva i mnoge druge, među kojima i Jugoslavija. U novije vreme mišljenje o povoljnosti različitih načina uzemljenja i u nemačkim državama ne ide više tako odlučno u prilog kompenzacije već se sve više primenjuju i druga rešenja.

U SAD razvoj je tekao u drugom pravcu. Pošto je vrlo brzo došlo do fuzija privatnih kompanija za snabdevanje električnom energijom i telegrafski i telefonski saobraćaj, nisu postojale teškoće da se koordiniraju mere bezbednosti u odnosu na struje kvara. Kao preovlađujuće rešenje usvojeno je direktno uzemljenje i uzemljenje preko male impedanse — otpornika ili prigušnice. U zapadnim delovima zemlje

dugo se ostalo kod izolovanog pogona. Osnovne prednosti koje je, po mišljenju američkih inženjera, donosilo uzemljenje preko male impedanse bile su: ograničenje prenapona pri zemljospojevima, olakšavanje delovanja prekidača, kako kod isključivanja zemljospojeva, tako i slabo opterećenih vodova i jednostavna zaštita. Na sl. 1 prikazana je procentualna zastupljenost pojedinih načina uzemljenja u prenosnim i distributivnim sistemima SAD napona 22 do 70 kV u periodu 1923—1947. godine [112]. Kako se vidi, vremenom se postepeno od izolovanih mreža prelazilo na direktno uzemljenje tako da je 1945. godine oko 70% mreža direktno uzemljeno. Opaža se blaga tendencija porasta primene uzemljenja preko male reaktanse pa i primene kompenzacionih prigušnica, koja je ipak ograničena na pojedine posebne slučajeve.



Sl. 1.

Prema podacima iz [40], kompenzaciju struje zemljospoja prvi je u Francuskoj primenio Ž. Klod (George Claude) 1893. godine. Bila je kompenzovana jednofazna mreža pijace u Parizu radi smanjivanja struja koje se odvode u tle i zaštite od opasnih napona. Pomenuto rešenje, međutim, nije u Francuskoj našlo širu primenu zbog bojazni od prenapona koji se mogu imati kod izvesnih manipulacija, usled pražnjenja energije prigušnice. Kao opšte rešenje za distributivne mreže vrlo brzo je, posle stvaranja organizacije EDF (Electricité de France), usvojeno uzemljenje preko male otpornosti ili reaktanse, koje se i danas bez izuzetka primenjuje. Interesantan je istorijski paradoks da su i Nemačka i Francuska pioniri u primeni načina uzemljenja od kojih su u daljem razvoju odustali, a druga ih je strana prihvatila.

U Velikoj Britaniji je vrlo rano, dvadesetih godina ovog veka, usvojeno uzemljenje preko male impedanse ili direktno uzemljenje u distributivnim mrežama svih naponskih nivoa. Kompenzacija struje zemljospoja se izbegava iz bojazni od

prelaska u dvostruke zemljospojeve, koji su bili dosta česti, a i od trajnijeg rada sa jednofaznim zemljospojevima.

U SSSR se do tridesetih godina ovog veka u distributivnim mrežama koristila kompenzacija po ugledu na strana iskustva. Ova se tehnika međutim nije pokazala dovoljno efikasnom u pogledu suzbijanja prenapona i gašenja zemljospojeva već je, naprotiv, u nizu slučajeva dolazilo do visokih prenapona pri kvarovima i manipulacijama u mreži [17]. Zato su mnoge mreže u periodu neposredno pre drugog svetskog rata do pedesetih godina ovog veka prešle na uzemljenje preko otpornika a pojedine su radile i direktno uzemljene. Dugogodišnje osciloskopske analize pogona kompenzovanih mreža, mnogi eksperimenti i rad na razvoju relejne zaštite omogućili su dobru razradu tehničkih rešenja i eksploatacionih postupaka kojima se znatno poboljšao rad pomenutih mreža. Kompenzacija struje zemljospoja prihvaćena je ponovo kao tipsko rešenje za distributivne mreže i zadržana je kao takva do danas.

Kako se može uočiti iz kratkog istorijskog pregleda, razvoj tehničkih ideja i ostvarenja u oblasti uzemljenja distributivnih mreža tekao je u osnovi u dva pravca — prema kompenzaciji i uzemljenju preko male impedanse. Oba rešenja su vremenom tehnički usavršena u toj meri da obezbeđuju zadovoljavajući pogon mreže kod porasta prostranosti i oba mogu da predstavljaju dobar izbor posle napuštanja izolovanog pogona. Pomenuta rešenja razvijala su se uglavnom nezavisno zbog istorijskih, jezičkih i geografskih prepreka i dostigla su visok tehnički nivo koji može dobro da zadovolji zahteve savremenih mreža, zadržavajući određene specifičnosti, mane i prednosti.

1. STRUJE I NAPONI KOD ZEMLJOSPOJEVA

Način uzemljenja neutralne tačke jako utiče na vrednosti struja i napona kod različitih kvarova prouzrokovanih ili praćenih kontaktom faznih provodnika sa zemljom ili uzemljenim delovima. Pojave pri ovakvim kvarovima — zemljospojevima, s druge strane, moraju se uvažavati pri projektovanju i eksploataciji mreže i mogu bitno uticati i kod opredeljivanja za način uzemljenja neutralne tačke.

U ovom poglavlju izvode se izrazi za struje i napone pri karakterističnim zemljospojevima. Pomenuti izrazi predstavljaju osnovu za analizu pojedinih važnih prelaznih pojava kod kvarova u različito uzemljenim mrežama, koja se izvodi docnije u odgovarajućim posebnim poglavljima. Takođe se izvode formule za proračun stacionarnih vrednosti napona i struja kod zemljospojeva i prikazuje, preko podesnih dijagrama, njihova zavisnost od karakterističnih parametara mreže. Navedeni podaci koriste se u kasnijim poglavljima za različite procene uslova rada mreže i odgovarajuće zaštite i signalizacije.

Zemljospojevi u mreži analizirani su preko α, β, 0 komponenti napona i struja, primenom Laplasove transformacije i kompleksnih amplituda. Pošlo se od pretpostavke da su razmatrane mreže srednjeg napona u potpunosti distributivne, bez sopstvenih izvora, tako da između njih i generatora postoje bar dve transformacije. U opisanim uslovima uticaj parametara generatora na procese kod kvarova u mrežama srednjeg napona nije od velikog praktičnog značaja. Napojna se mreža može u odnosu na mrežu srednjeg napona zadovoljavajuće dobro zameniti šemom sa prostoperiodičnom e. m. s. direktnog redosleda i konstantnim reaktansama (induktivnostima), izračunatim iz podataka o snazi trofaznog kratkog spoja u tačkama napajanja mreže srednjeg napona u tranzijentnom periodu. Ova se snaga praktično poklapa sa snagom za subtranzijentni period, a ne razlikuje se bitno ni od snage za trajni period, ako se uvaži delovanje regulacije napona u prenosnoj mreži.

Uvedene pretpostavke, po pravilu opravdane za većinu distributivnih mreža, omogućavaju jednostavnu primenu α, β, 0 komponenti, pošto nije potrebno složeno predstavljanje sinhronih generatora izvora i može se smatrati da elementi mreže imaju jednake parametre za α i β redosled.

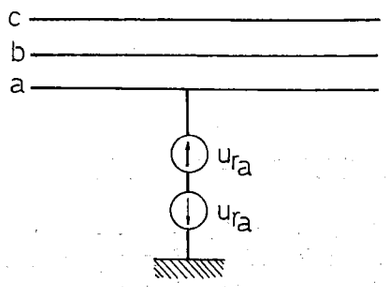
1.1. JEDNOFAZNI ZEMLJOSPOJ

1.1.1. OPŠTI IZRAZI

Zemljospoj jedne faze, na primer faze *a*, može se prikazati kao na sl. 1.1. Elektromotornoj sili (e. m. s.) u_{ra}, jednakoj naponu faze *a* na mestu kvara kada kvara nema, superponira se ista tolika e. m. s. koja deluje u suprotnom smeru.

Pored e. m. s. na mestu kvara, u mreži deluju i e. m. s. izvora iz kojih se napaja mreža.

Prilike posle zemljospoja mogu se analizirati, pošto je mreža po pretpostavci linearna, superpozicijom dejstava grupa e. m. s. Sve e. m. s. u mreži rastavićemo na dve grupe: prvu grupu sačinjavaće e. m. s. izvora i e. m. s. u_{ra}, a drugu, samo e. m. s. $-u_{ra}$.



Sl. 1.1

Sve linearne veličine v mreže mogu se sada izračunati sabiranjem vrednosti koje se dobijaju pri odvojenom delovanju pomenutih grupa e. m. s.

Tako se može napisati

$$v = v' + v''. \tag{1.1}$$

Ovde smo sa v' označili komponentu veličine v usled delovanja prve grupe e. m. s. a sa v'', usled dejstva e. m. s. $-u_{ra}$.

Prvi komponentni režim poklapa se, očigledno, sa režimom koji bi se imao u mreži kada ne bi došlo do zemljospoja na razmatranom mestu, pošto u oba režima deluju iste e. m. s. Ako se pretpostavi da je mreža pre kvara bila u normalnom pogonu, komponente v' poklapaju se sa normalnim radnim vrednostima odgovarajućih veličina

$$v' = v_r, \tag{1.2}$$

tako da poseban proračun ovih komponenti nije potreban.

Proučavanje prilika pri zemljospoju svodi se tako na proračun samo komponenti v''. Pomenuti proračuni olakšani su time što u mreži deluje samo jedna e. m. s. poznatog vremenskog toka i što su početni uslovi mreže za komponente v'' jednaki nuli.

Inercione veličine mreže, zbog svoje kontinualnosti, neposredno pre i posle nastanka zemljospoja imaju jednake vrednosti. Ako se vreme meri od trenutka uspostavljanja zemljospoja, za pomenute veličine biće, prema tome,

$$v(0_-) = v(0_+),$$

odnosno, s obzirom na (1.1),

$$v'(0_-) + v''(0_-) = v'(0_+) + v''(0_+). \tag{1.3}$$

Pre pojave kvara režim mreže se poklapa sa prvim komponentnim režimom, iz čega sledi

$$v'(0_-) = v(0_-)$$

i onda, saglasno (1.1),

$$v''(0_-) = 0. \tag{1.4}$$

Pošto se prvi komponentni režim poklapa sa režimom mreže bez kvara, kod inercionih veličina mora takođe da bude ispunjen i uslov

$$v'(0_-) = v'(0_+). \tag{1.5}$$

S obzirom na (1.4) i (1.5), iz (1.3) se konačno dobija

$$v''(0_+) = 0, \tag{1.6}$$

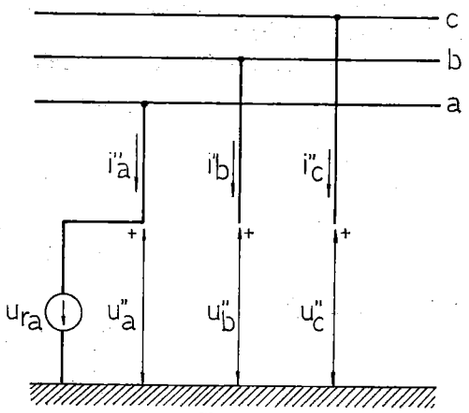
što smo i hteli pokazati.

Komponente v'' mogu se, s obzirom na prirodu veličina v', smatrati otklonima od veličina mreže u režimu bez zemljospoja.

Mi ćemo se u daljim razmatranjima baviti prvenstveno proračunima otklona v''. Stvarne vrednosti pojedinih veličina mreže izračunavaće se naknadno, primenom superpozicije (1.1).

Prilike na mestu zemljospoja pri delovanju e. m. s. $-u_{ra}$ prikazane su na sl. 1.2. One se mogu opisati sledećim relacijama

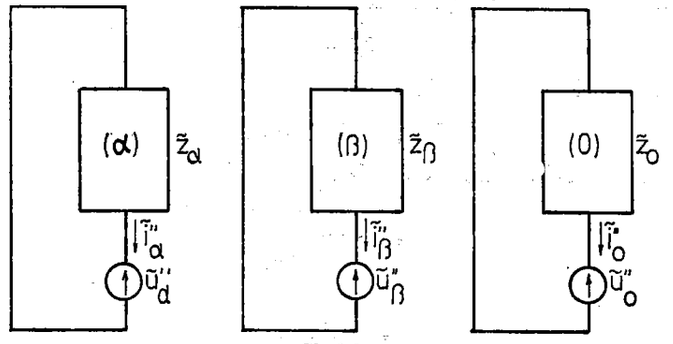
$$\begin{aligned} u_a'' &= -u_{ra}, \\ i_b'' &= 0, \\ i_c'' &= 0. \end{aligned} \tag{1.7}$$



Sl. 1.2

Proračun ćemo izvesti preko $\alpha, \beta, 0$ komponenti veličina mreže, koje obrazuju odgovarajuće trofazne redoslede (Prilog II), primenom Laplasove transformacije (Prilog I).

Analiza pomenutih komponentnih redosleda može se, kao što je poznato (Prilog II), izvoditi odvojeno za svaki redosled, preko odgovarajućih jednopolnih šema mreže (sl. 1.3).



Sl. 1.3

U šemama na sl. 1.3 su sa $\tilde{u}_\alpha''$, $\tilde{u}_\beta''$, $\tilde{u}_0''$ i $\tilde{i}_\alpha''$, $\tilde{i}_\beta''$, $\tilde{i}_0''$ označene Laplasove transformacije $\alpha, \beta, 0$ komponenata napona i struja na mestu kvara. Pošto u razmatranom slučaju ne postoje drugi izvori sem e. m. s. na mestu zemljospoja, mreža se u svim redosledima svodi na kombinaciju impedansi elemenata, što je na sl. 1.3 simbolično prikazano pravougaonim blokovima. Sa $\tilde{z}_\alpha$, $\tilde{z}_\beta$ i $\tilde{z}_0$ označene su ekvivalentne impedanse mreže za odgovarajuće redoslede, određene na mestu kvara, tj. mestu delovanja napona $\tilde{u}_\alpha''$, $\tilde{u}_\beta''$, $\tilde{u}_0''$.

Na osnovu šema na sl. 1.3 mogu se napisati sledeće relacije:

$$\tilde{u}_\alpha'' = -\tilde{z}_\alpha \tilde{I}_\alpha'' \tag{1.8}$$

$$\tilde{u}_\beta'' = -\tilde{z}_\alpha \tilde{I}_\beta'' \tag{1.9}$$

$$\tilde{u}_0'' = -\tilde{z}_0 \tilde{I}_0'' \tag{1.10}$$

Odnosi (1.8) do (1.10) predstavljaju jednačine mreže za α, β, 0 komponente i istog su oblika nezavisno od vrste nesimetrije na mestu kvara.

Vrsta nesimetrije određuje odnose između komponenti napona i struja na mestu nesimetrije. Pomenute veze proističu iz jednačina nesimetrije (1.7).

Ako se ima u vidu da je po definiciji (II. 17)

$$\tilde{u}_a'' = \tilde{u}_\alpha'' + \tilde{u}_0''$$

$$\tilde{I}_b'' = -\frac{\tilde{I}_\alpha''}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{I}_\beta'' + \tilde{I}_0'' \tag{1.11}$$

$$\tilde{I}_c'' = -\frac{\tilde{I}_\alpha''}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{I}_\beta'' + \tilde{I}_0'',$$

iz (1.7) se dobija

$$\tilde{u}_\alpha'' + \tilde{u}_0'' = -\tilde{u}_{ra}, \tag{1.12}$$

$$\tilde{I}_\beta'' = 0, \tag{1.13}$$

$$2\tilde{I}_0'' = \tilde{I}_\alpha''. \tag{1.14}$$

Relacije (1.11) do (1.14) zajedno sa jednačinama (1.8) do (1.10) omogućavaju proračun α, β, 0 komponenti napona i struja na mestu kvara.

Iz (1.9) i (1.13) zaključuje se da je

$$\tilde{u}_\beta'' = 0. \tag{1.15}$$

Iz (1.8), (1.10) i (1.12) dobija se

$$\tilde{z}_\alpha'' \tilde{I}_\alpha'' + \tilde{z}_0 \tilde{I}_0'' = \tilde{u}_{ra} \tag{1.16}$$

Iz (1.16), s obzirom na (1.14), sledi

$$\tilde{I}_\alpha'' = \frac{2\tilde{u}_{ra}}{2\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0} \tag{1.17}$$

i

$$\tilde{I}_0'' = \frac{\tilde{u}_{ra}}{2\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0}. \tag{1.18}$$

Saglasno (1.8), (1.10), (1.17) i (1.18), konačno se dobija

$$\tilde{u}_\alpha'' = -\frac{2\tilde{z}_\alpha \tilde{u}_{ra}}{2\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0}, \tag{1.19}$$

$$\tilde{u}_0'' = -\frac{\tilde{z}_0 \tilde{u}_{ra}}{2\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0}. \tag{1.20}$$

Time su određene sve komponente napona i struja na mestu kvara.

Struja jednofaznog zemljospoja poklapa se, kako je pokazano, sa strujom i_a'' (sl. 1.2).

$$\tilde{I}_z = \tilde{I}_a''. \tag{1.21}$$

Saglasno opštim relacijama za proračun faznih veličina iz α, β, 0 komponenti (II. 17) je, onda

$$\tilde{I}_z = \tilde{I}_\alpha'' + \tilde{I}_0'',$$

ili prema (1.17) i (1.18)

$$\tilde{I}_z = \frac{3\tilde{u}_{ra}}{2\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0}. \tag{1.22}$$

Vremenski tok struje dobija se inverzijom Laplasove transformacije

$$i_z = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{3\tilde{u}_{ra}}{2\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0}\right\}. \tag{1.23}$$

Napon $\tilde{u}_b''$ (sl. 1.2) izračunava se, saglasno (II. 17), kao

$$\tilde{u}_b'' = -\frac{\tilde{u}_\alpha''}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{u}_\beta'' + \tilde{u}_0''. \tag{1.24}$$

S obzirom na (1.15), (1.19) i (1.20), iz (1.24) se dobija

$$\tilde{u}_b'' = \frac{\tilde{z}_\alpha - \tilde{z}_0}{2\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0}\tilde{u}_{ra}. \tag{1.25}$$

Napon $\tilde{u}_c''$ određuje se prema (II. 17) relacijom

$$\tilde{u}_c'' = -\frac{\tilde{u}_\alpha''}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{u}_\beta'' + \tilde{u}_0''. \tag{1.26}$$

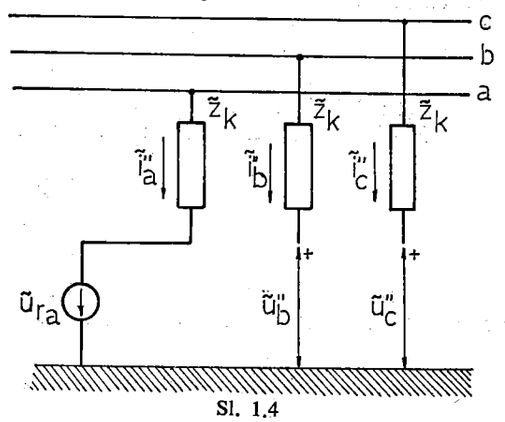
S obzirom na (1.15) napon $\tilde{u}_c''$ poklapa se sa $\tilde{u}_b''$:

$$\tilde{u}_c'' = \frac{\tilde{z}_\alpha - \tilde{z}_0}{2\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0}\tilde{u}_{ra}. \tag{1.27}$$

Naponi na fazama »*b*« i »*c*« pri zemljospoju dobijaju se, prema (1.1) i (1.2), sabiranjem komponenti (1.25) odnosno (1.27) sa naponima na istim fazama u režimu bez zemljospoja

$$u_b = u_{rb} + \mathcal{L}^{-1}\{\tilde{u}_b''\} \tag{1.28}$$

$$u_c = u_{rc} + \mathcal{L}^{-1}\{\tilde{u}_c''\} \tag{1.29}$$



Sl. 1.4

U pojedinim praktičnim analizama treba obuhvatiti i uticaj prelazne impedanse na mestu kvara, na primer otpornost električnog luka. Ako pomenutu impedansu označimo sa $\tilde{z}_k$, umesto šeme na sl. 1.2 za proračune može se koristiti šema prikazana na sl. 1.4. Impedansa $\tilde{z}_k$,

iako ova postoji fizički samo kod neispravne faze, postavljena je, kako se vidi, kod sve tri faze. Ovim se, međutim, ne remete stvarni uslovi na mestu kvara, pošto kroz otočne veze za faze b i c ne protiču struje i impedanse $\tilde{z}_k$ ne stvaraju nikakve padove napona.

Iz sl. 2.4 sledi da se veličine mreže pri jednofaznom zemljospoju preko impedanse mogu izračunati primenom izraza izvedenih za neposredni spoj, ako se impedanse mreže za odgovarajuće redoslede povećaju za $\tilde{z}_k$.

Tako se, na primer, na osnovu (1.22) za struju zemljospoja u razmatranom slučaju dobija

$$\tilde{I}_z = \frac{3\,\tilde{u}_{ra}}{2\,\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0 + 3\,\tilde{z}_k}. \tag{1.30}$$

1.1.2. TALASNI PROCESI

Naponski talasi

Posle nastanka zemljospoja pogođena faza ne dolazi na celoj svojoj dužini trenutno na nulti potencijal. Električni naboj faze prazni se oscilatorno preko talasnih procesa koji se odvijaju između mesta zemljospoja i krajeva voda u kvaru.

Naponi u_α'' i u_0'' na mestu kvara neposredno posle njegovog uspostavljanja mogu se izračunati kao (Prilog I)

$$\begin{aligned} u_\alpha''(0) &= \lim_{s\to\infty} s\,\tilde{u}_\alpha'' \\ u_0''(0) &= \lim_{s\to\infty} s\,\tilde{u}_0''. \end{aligned} \tag{1.31}$$

Iz (1.31) se, obzirom na (1.19) i (1.20), dobija

$$u_\alpha''(0) = -\lim_{s\to\infty}\left(\frac{2\,\tilde{z}_\alpha}{2\,\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0}\right)\lim_{s\to\infty}(s\,\tilde{u}_{ra}) = -\frac{2\,z_\alpha}{2\,z_\alpha + z_0}\,u_{ra}(0) \tag{1.32}$$

i, na sličan način,

$$u_0''(0) = -\frac{z_0'}{2\,z_\alpha + z_0}\,u_{ra}(0). \tag{1.33}$$

U (1.32) i (1.33) z_α i z_0 predstavljaju početne, impulsne impedanse mreže za α i 0 redosled, računato na mestu zemljospoja

$$z_\alpha = \lim_{s\to\infty} \tilde{z}_\alpha, \tag{1.34}$$

$$z_0 = \lim_{s\to\infty} \tilde{z}_0. \tag{1.35}$$

Ako se kvar dogodio na nekom mestu duž voda, impedanse z_α i z_0 biće jednake polovini talasnih impedansi voda za odgovarajuće redoslede [5,74] (sl. 1.5)

$$z_\alpha = \frac{1}{2}\,z_{v\alpha} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}, \tag{1.36}$$

$$z_0 = \frac{1}{2}\,z_{v0} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \tag{1.37}$$

U izrazima figuriraju konstante voda po jedinici dužine.

Parametri L i C poklapaju se sa normalnim pogonskim parametrima voda (Prilog II). Takođe i nulti kapacitet C_0 ima svoju uobičajenu vrednost. Parametar L_0, međutim, predstavlja nultu induktivnost voda kod visokih učestanosti.

Kod troolovnih, ekranizovanih i jednožilnih kablova, kakvi se primenjuju po pravilu kod viših distributivnih napona, je

$$C = C_0. \tag{1.38}$$

Takođe je kod većine kablova, posebno onih sa čeličnom armaturom i

$$L \approx L_0, \tag{1.39}$$

pošto znatan deo povratne struje protiče preko metalnog plašta kabla ili u njegovoj neposrednoj blizini.

Iz (1.38) i (1.39) proizilazi da je kod kablovskih vodova približno

$$z_{v\alpha} \approx z_{v0}. \tag{1.40}$$

Tipične vrednosti impedansi kablovskih vodova leže u opsegu

$$z_{v\alpha},\ z_{v0} = 10 \div 50\ (\Omega) \tag{1.41}$$

Kod vazdušnih vodova je pogonski kapacitet uvek veći od nultog zbog postojanja međusobnih kapaciteta faza. Pri tom je obično

$$C = (1{,}6 \div 2)\,C_0. \tag{1.42}$$

Nulte induktivnosti za visoke učestanosti imaju nešto manje vrednosti nego za 50 Hz pošto povratne struje, usled skin efekta, teku vrlo blizu površine zemlje i tako smanjuju veličinu strujne omče.

Za uobičajene geometrijske parametre vazdušnih vodova mreža srednjeg napona može se smatrati da je

$$L_0 = (1{,}5 \div 2)\,L. \tag{1.43}$$

Iz (1.42) i (1.43) proizilazi da je za vazdušne vodove

$$z_{v0} \approx 2\,z_{v\alpha} \tag{1.44}$$

Kod vazdušnih vodova sa jednim provodnikom po fazi, kakvi se imaju u distributivnim mrežama, je

$$z_{v\alpha} \approx 400\ \Omega \tag{1.45}$$

Pod delovanjem e. m. s. $u_\alpha''(0)$ i $u_0''(0)$ u šemama α i 0 redosleda potećiće od mesta kvara ka krajevima vodova talasi napona koji su po vrednostima jednaki pomenutim e. m. s. (sl. 1.5).

Brzina prostiranja talasa uslovljena je, kako je poznato [1,74], parametrima vodova za odgovarajuće redoslede.

Kod α redosleda ova je brzina, ako se zanemare toplotni gubici,

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c_s}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}. \tag{1.46}$$

U (1.46) smo sa c_s označili brzinu svetlosti, a sa μ_r i ε_r relativni permeabilitet i relativnu dielektričnu konstantu sredine u kojoj se nalaze provodnici voda.

Za vazdušne vodove je

$$\mu_r \approx \varepsilon_r \approx 1$$

tako da iz (1.46) sledi

$$v \approx c_s = 300 \text{ m}/\mu\text{s}. \tag{1.47}$$

Kod kablovskih vodova je obično

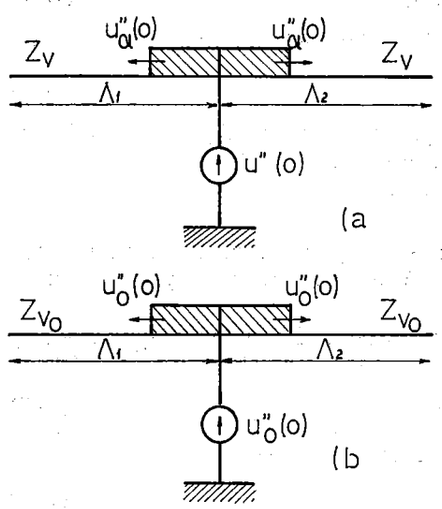
$$\mu_r \approx 1$$

$$\varepsilon_r = 3 \div 4 \tag{1.48}$$

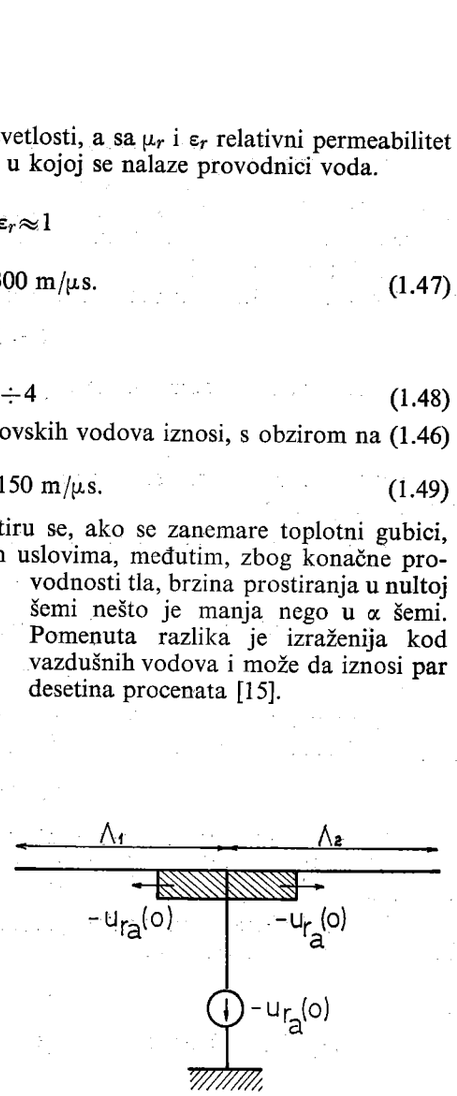
Brzina prostiranja α talasa duž kablovskih vodova iznosi, s obzirom na (1.46) i (1.48)

$$v = 100 \div 150 \text{ m}/\mu\text{s}. \tag{1.49}$$

Naponski talasi u nultoj šemi prostiru se, ako se zanemare toplotni gubici, istom brzinom kao i α talasi. U stvarnim uslovima, međutim, zbog konačne provodnosti tla, brzina prostiranja u nultoj šemi nešto je manja nego u α šemi. Pomenuta razlika je izraženija kod vazdušnih vodova i može da iznosi par desetina procenata [15].



Sl. 1.5



Sl. 1.6

U šemama na sl. 1.5 na jednom kraju voda nalazi se napojni, a na drugom, prijemni transformator. Oba ova transformatora suprotstavljaju, zbog svog induktivnog karaktera, praktično beskonačno velike otpore prostiranju talasa i α i 0 redosleda tako da se ovi pri nailasku udvostručuju. Iz navedenog proizilazi da se talasi napona oba redosleda jednako ponašaju na krajevima voda iako su talasni otpori voda različiti. Ako se zanemari razlika brzina prostiranja i prigušenja, razmatrani talasi jednako se prostiru duž celog voda, potpuno sinhrono. Zbog toga je nepotrebno, u kvalitativnim razmatranjima naše vrste, analizu procesa izvoditi odvojeno za α odnosno 0 redosled, već objedinjeno za ukupni talas

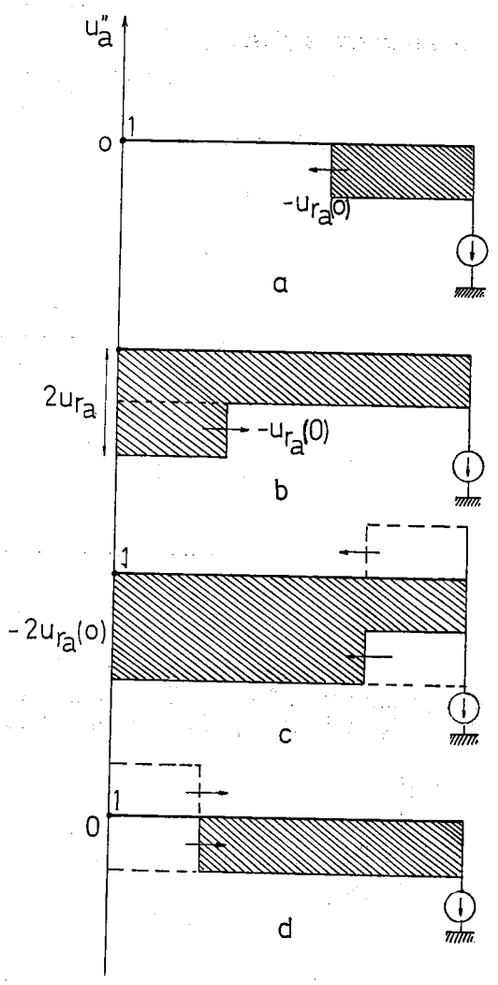
$$u_\alpha'' + u_0'' = u_a'', \tag{1.50}$$

koji se prostire po pogođenoj fazi.

Šema za proračun prostiranja napona u_a'' prikazana je na sl. 1.6.

Na sl. 1.7 pokazane su šematski karakteristične faze oscilovanja talasa na delu voda do kraja 1.

Posle nastanka kvara naponski talas polazi ka kraju 1 (skica a). Pri nailasku na kraj 1 naponski talas se odbija, tako da se napon, usled sabiranja upadnog i odbijenog talasa, udvostručava (skica b). Talas odbijen od kraja 1 pri dolasku u tačku delovanja izvora menja znak i ponovo se vraća ka kraju 1 (skica c). Pri upadu na kraj 1 pomenuti talas se odbija sa istim znakom tako da, superponiran na prethodno stanje, dovodi vod na nulti potencijal (skica d). Posle upada na mesto delovanja e. m. s., razmatrani talas se odbija sa izmenjenim znakom i tako se ponovo uspostavlja situacija prikazana na skici a. Opisani procesi nastavljali bi se dalje ciklično u nedogled kada ne bi bili prigušeni usled toplotnih gubitaka.



Sl. 1.7

Na sl. 1.8 prikazan je idealizovan vremenski tok napona »u_a''« na krajevima 1 u skladu sa opisanim procesima.

Na slici je sa T_1 označeno vreme dvostrukog prelaska talasa deonice voda od kvara do kraja 1

$$T_1 = \frac{2\Lambda_1}{v}. \tag{1.51}$$

Jedna perioda oscilacija napona iznosi, kako se vidi sa sl. 1.8

$$\theta = 2T_1 \tag{1.52}$$

ili, s obzirom na (1.51),

$$\theta = \frac{4\Lambda_1}{v}. \tag{1.53}$$

Učestanost razmatranih procesa je, prema tome,

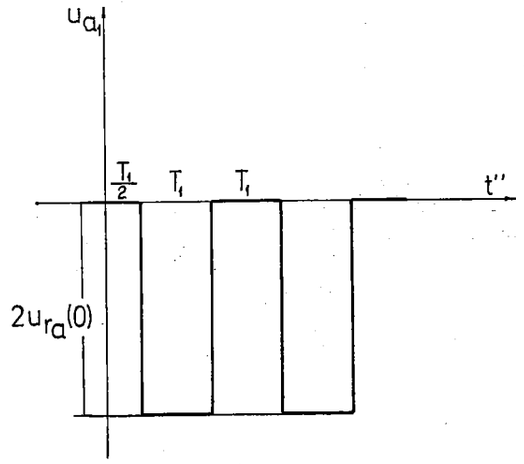
$$f = \frac{1}{\theta} = \frac{v}{4\Lambda_1}. \tag{1.54}$$

Iz (1.54) se za vazdušne vodove dobija, s obzirom na (1.47),

$$f = \frac{75\,000}{\Lambda_1/\text{km}}\ \text{Hz} \tag{1.55}$$

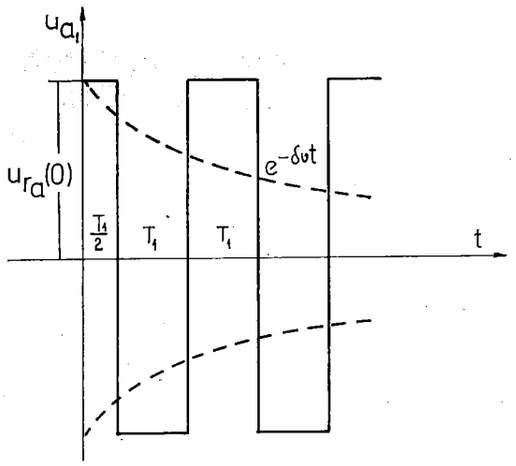
a za kablovske, saglasno (1.49),

$$f = \frac{25\,000 \div 37\,500}{\Lambda_1/\text{km}}\ \text{Hz} \tag{1.56}$$



Sl. 1.8

Stvarni naponi na pogođenoj fazi dobijaju se kada se na komponentu u_a'' superponira napon faze u režimu bez kvara. U toku razmatranih procesa koji zbog brzog prigušenja ne traju duže od par stotina μs, pomenuti napon neće se praktično promeniti od svoje vrednosti u momentu nastanka kvara, $t = 0$, tako da se može pisati



Sl. 1.9

$$u_a' = u_{ra}(0). \tag{1.57}$$

Stvarni napon faze a je, prema tome,

$$u_a = u_{ra}(0) + u_a''. \tag{1.58}$$

Idealizovani tok napona na kraju 1 voda, saglasno (1.58) i sl. 1.8, prikazan je na sl. 1.9.

Prigušenje naponskog talasa usled toplotnih gubitaka na vodu i u tlu može se približno proceniti preko relacije

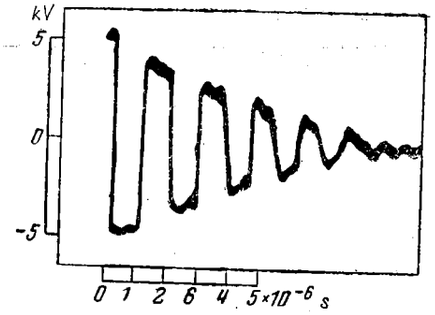
$$u_x = u_0\, e^{-\delta x}. \tag{1.59}$$

U (1.59) je indeksom »o« označena početna vrednost temena naponskog talasa, a indeksom x njegova vrednost pošto je po vodu prešao rastojanje x. Parametar δ predstavlja koeficijent prigušenja voda, koji se može približno odrediti prema formuli [1]

$$\delta = \frac{1}{2}\left(\frac{r}{z} + gz\right). \tag{1.60}$$

U (1.60) smo sa r i g označili podužnu otpornost i odvodnost voda, a sa z njegovu talasnu impedansu. Pošto pomenuti parametri imaju različite vrednosti u pojedinim redosledima, to će se i koeficijenat δ razlikovati. Zbog velikih vrednosti otpornosti, nulte komponente napona brže se prigušuju od α komponenata. Isprekidano izvučene krive na sl. 1.9 predstavljaju obvojnice dijagrama napona kada se obuhvati prigušenje prema (1.59) sa jedinstvenim parametrom δ.

Na sl. 1.10 prikazan je oscilogram napona faze pogođene zemljospojem, snimljen u mreži [2]. Kvar se dogodio na kraju voda, a snimak se odnosi na mesto kvara. Kako se vidi, proces se potpuno prigušuje za oko 10 μs.



Sl. 1.10

Naponi u_b'' i u_c'' na ispravnim fazama u talasnim procesima izračunavaju se, na osnovu (1.25) i (1.27), kao

$$u_b'' = u_c'' = -\frac{z_0 - z_\alpha}{2z_\alpha + z_0}\, z_{ra}(0). \tag{1.61}$$

Ako se ima u vidu (1.40), iz (1.61) se zaključuje da se kod kablovskih vodova talasni procesi praktično ne odvijaju na fazama koje nisu pogođene kvarom. Ovo je sigurno slučaj kod troolovnih, ekranizovanih ili jednožilnih kablova sa metalnim plaštom.

Kod vazdušnih vodova je, s obzirom na (1.44),

$$u_b'' = u_c'' \approx -0{,}25\, u_{ra}(o), \tag{1.62}$$

što takođe ne predstavlja nikakav prenapon.

Kako se iz dijagrama na sl. 1.9 vidi, naponi na pogođenoj fazi usled talasnih procesa ne prevazilaze vrednosti radnih faznih napona. Dijagram je dobijen za najnepovoljniji slučaj kada sa napojnih sabirnica ne polaze i drugi vodovi sem posmatranog. Kada su na sabirnicama napojnog transformatora vezani i drugi vodovi, što je po pravilu slučaj, na kraju 1 ne dolazi do udvostručenja napona već, naprotiv, do njegovog smanjenja zbog malog ekvivalentnog otpora postojećih vodova. U takvom se slučaju talasni procesi karakterišu još nižim naponima.

Dijagram na sl. 1.9 odnosi se bliže na prilike na krajevima krajnjeg prijemnog transformatora na vodu, ako je razmatrana mreža radijalna.

Naponski talasi mogu da prouzrokuju prenapone u neutralnoj tački napojnih transformatora ako su u rezonansi sa sopstvenim oscilacijama namotaja transformatora [2]. Sopstvena učestanost transformatora je reda 5÷30 (kHz), ako je sprege zvezda—zvezda bez kompenzacionog namotaja, a 70 kHz i više ako je sprege trougao—zvezda ili ima kompenzacioni namotaj. Ove su pojave vrlo retke i mogu da

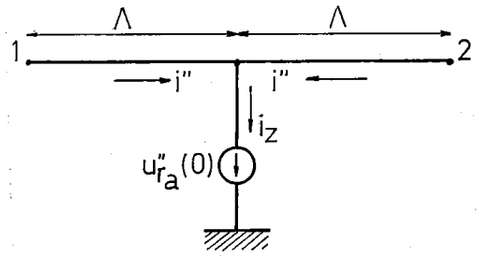
nastanu samo u slučajevima kada pored voda u kvaru sa sabirnica transformatora ne prolaze i drugi vodovi.

Sličnih pojava takođe neće biti ni kod krajnjih, potrošačkih transformatora ako su ovi na strani mreže vezani u trougao, što je najčešće slučaj.

Strujni talasi

Početna vrednost struje jednofaznog zemljospoja posle nastanka kvara jednaka je, saglasno (1.22),

$$i_z(0) = \lim_{s\to\infty} s\,\bar{i}_z = \frac{3\,u_{ra}(0)}{2\,z_\alpha + z_0}. \tag{1.63}$$

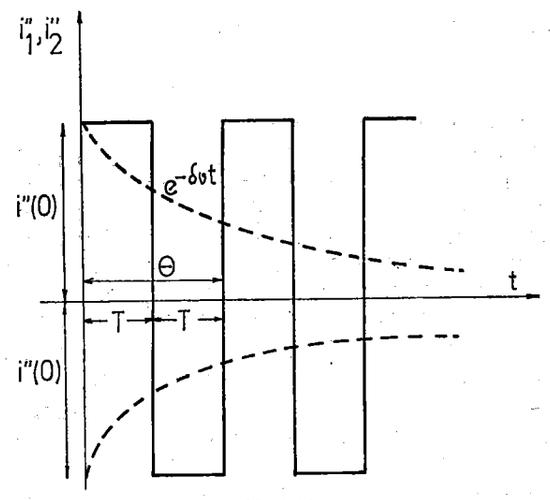


Sl. 1.11

Struja $i_z(0)$ dobija se sabiranjem struja koje u mesto kvara dotiču preko deonica voda od krajeva 1 i 2 (sl. 1.11). Idealizovani vremenski tok struja i_1'' i i_2'', oblika je kao na sl. 1.12. On je dobijen na osnovu slične analize kao za naponske prilike. Isprekidano su ucrtane krive prigušenja amplitude struja usled gubitaka, koje predstavljaju obvojnice realnog dijagrama toka struja.

Početne vrednosti struja i_1'' i i_2'' međusobno su jednake i određene su talasnim otporima voda

$$i_1''(0) = i_2''(0) = \frac{3\,u_{ra}(0)}{2\,z_{v\alpha} + z_{vo}}. \tag{1.64}$$



Sl. 1.12

Sa T je označeno vreme dvostrukog prelaska odgovarajuće deonice voda. Perioda i učestanost promene struja voda izračunavaju se saglasno (1.53) i (1.54) za odgovarajuće vrednosti Λ_1 odnosno Λ_2.

Ako se pretpostavi da je vremenski tok radnog napona faze a oblika

$$u_{ra} = \sqrt{2}\,U_{nf}\cos(\omega t + \varphi), \tag{1.65}$$

iz (1.63) se dobija

$$i_z(0) = 6\,\frac{\sqrt{2}\,U_{nf}\cos\varphi}{2\,z_{v\alpha} + z_{vo}}. \tag{1.66}$$

S obzirom na (1.40), iz (1.66) se za kablovske vodove dobija

$$i_z(0) = \frac{2\sqrt{2}\,U_{nf}\cos\varphi}{z_{v\alpha}}. \tag{1.67}$$

Pošto je, u skladu sa (1.36) i (1.46)

$$z_{v\alpha} = \frac{1}{vC},$$

formuli (1.67) može se dati oblik

$$i_z(0) = 2\sqrt{2}\,vU_{nf}\,C\cos\varphi$$

odnosno

$$i_z(0) = \frac{2\sqrt{2}}{3\omega}\,v\,i_c\cos\varphi, \tag{1.68}$$

U (1.68) je uvedena veličina

$$i_c = 3\,\omega\,CU_{nf}, \tag{1.69}$$

koja kod kablovskih mreža, s obzirom na (1.38), predstavlja kapacitivnu struju zemljospoja po jedinici dužine kablova (pogledati Poglavlje 3).

S obzirom na (1.49), iz (1.68) se za kablovske mreže dobija

$$i_z(0) = (300 \div 450)\cos\varphi\,\frac{i_c}{A/\mathrm{km}}\ A. \tag{1.70}$$

Dobra procena početne vrednosti struje zemljospoja kod vazdušnih vodova dobija se neposredno iz (1.66) kada se za z_{vo} i $z_{v\alpha}$ uvrste vrednosti prema (1.44) i (1.45)

$$i_z(0) \approx 3\cos\varphi\,\frac{U_n}{\mathrm{kV}}\ A. \tag{1.71}$$

Kako se vidi iz (1.70) i (1.71), početne vrednosti struje zemljospoja mogu da budu znatne. Kod kablova one mogu da dostignu i nekoliko kA. Ipak, budući da se talasi struja, jednako kao i naponski talasi, prigušuju vrlo brzo, toplotni i elektromagnetni uticaji početnih struja zemljospoja nisu od praktičnog značaja. Na osnovu

toka talasnih procesa može se, međutim, prosuđivati o mestu zemljospoja, što se koristi za selektivnu zaštitu (Odeljak 7.4).

Zbog velikih impulsnih impedansi transformatora talasi napona i struja kod pražnjenja električnog opterećenja faze pogođene zemljospojem praktično ne prodiru u namotaje transformatora. Otuda parametri eventualne impedanse vezane u neutralnoj tački ne utiču na razmatrane procese. Oni se odvijaju približno jednako, nezavisno od načina uzemljenja mreže.

1.1.3. STACIONARNO STANJE

Struja jednofaznog zemljospoja u stacionarnom stanju dobija se, izražena preko kompleksnih amplituda veličina mreže, iz relacije (1.22), na osnovu formalne analogije (Tačka I.4),

$$\underline{I}_z = \frac{3\,\underline{U}_{ra}}{2\,\underline{Z}_\alpha + \underline{Z}_o}. \tag{1.72}$$

Budući da se struja trofaznog kratkog spoja $\underline{I}_{(3)}$ u fazi »*a*« izračunava kao odnos napona $\underline{U}_{ra}$ i pogonske impedanse mreže, to se, s obzirom na (II. 7) i (II. 21), ima

$$\underline{I}_{(3)} = \frac{\underline{U}_{ra}}{\underline{Z}_\alpha}. \tag{1.73}$$

Na osnovu (1.72) i (1.73) dobija se

$$\frac{\underline{I}_z}{\underline{I}_{(3)}} = \frac{3}{2 + \dfrac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}}. \tag{1.74}$$

Kako se vidi, odnos $\dfrac{\underline{I}_z}{\underline{I}_{(3)}}$ zavisi isključivo od parametara mreže za α i 0 redosled. Na sl. 1.13 razmatrani odnos prikazan je kao funkcija količnika $\dfrac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}$ za različite vrednosti razlike $\varphi_\alpha - \varphi_0$ argumenata pomenutih impedansi, koja je usvojena kao parametar krivih [4,75].

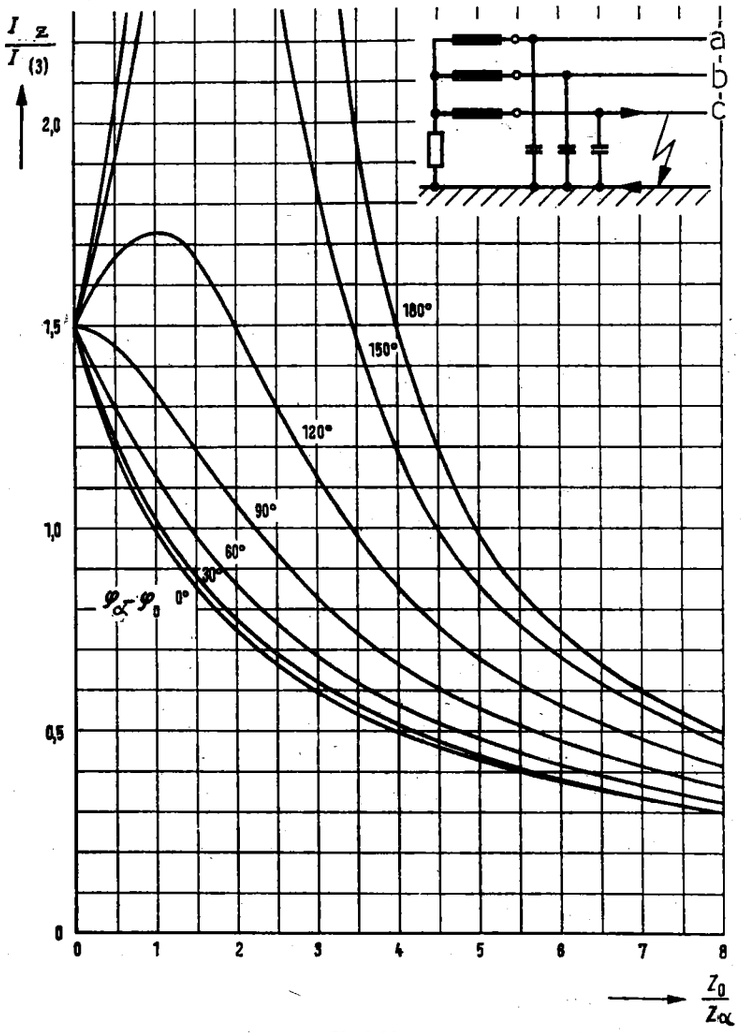
Krive na sl. 1.13 pokazuju da vrednosti struje jednofaznog zemljospoja jako zavise od razlike argumenata impedansi i da se povećavaju sa porastom ove razlike. Ugaona razlika $\varphi_\alpha - \varphi_0 > 90°$ može se imati kada $\underline{Z}_0$ ima kapacitivan karakter, što je karakteristično za mreže sa izolovanom neutralnom tačkom. Impedansa $\underline{Z}_\alpha$ je inače po pravilu izrazito induktivna. Vrednosti $\varphi_\alpha - \varphi_0$ bliske 90°, imaju se kod mreža uzemljenih preko male otpornosti kada je $\underline{Z}_0$ praktično čisto aktivno. Kod uzemljenja preko male reaktanse razmatrana ugaona razlika obično je bliska nuli.

Napon ispravne faze *b* u ustaljenom stanju može se, s obzirom na (1.25) i (1.28), izračunati kao

$$\underline{U}_b = \underline{U}_{rb} + \frac{\underline{Z}_\alpha - \underline{Z}_0}{2\,\underline{Z}_\alpha + \underline{Z}_0}\,\underline{U}_{ra}. \tag{1.75}$$

Ako se ima u vidu da između radnih napona mreže postoji odnos

$$\underline{U}_{rb} = \underline{U}_{ra}\, e^{-j\frac{2\pi}{3}},$$



Sl. 1.13

na osnovu (1.75) dobija se

$$\frac{U_b}{U_{ra}} = \left| e^{-j\frac{2\pi}{3}} + \frac{1 - \dfrac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}}{2 + \dfrac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}} \right|. \tag{1.76}$$

Saglasno (1.27) i (1.29) napon faze c jednak je

$$\underline{U}_c = \underline{U}_{rc} + \frac{\underline{Z}_\alpha - \underline{Z}_0}{2\,\underline{Z}_\alpha + \underline{Z}_0}\,\underline{U}_{ra}. \tag{1.77}$$

Budući da je

$$\underline{U}_{rc} = \underline{U}_{ra}\, e^{j\frac{2\pi}{3}},$$

iz (1.77) sledi

$$\frac{U_c}{U_{ra}} = \left| e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{1 - \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}}{2 + \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}} \right|. \tag{1.78}$$

Izrazi (1.76) i (1.78) vrlo su važni za izbor izolacionog stupnja mreže, jer ukazuju na veličinu stacionarnog prenapona pri jednofaznom zemljospoju. Naponi ispravnih faza pri jednofaznom zemljospoju određuju takođe i nazivni napon odvodnika prenapona, koji se ugrađuju u mrežu, od koga posredno zavisi i zaštitni nivo koji se može ostvariti odvodnicima.

Za mreže se, kao karakterističan parametar, određuje odnos napona ispravnih faza prema međufaznom radnom naponu mreže. Pomenuti odnos naziva se faktorom uzemljenja. U razmatranom slučaju, kod kvara na fazi »*a*«, faktor uzemljenja dobija se kao

$$k_{uz} \equiv \max\left(\frac{U_b}{\sqrt{3}\,U_{ra}},\ \frac{U_c}{\sqrt{3}\,U_{ra}}\right). \tag{1.79}$$

Smatra se da je mreža efikasno uzemljena ako je

$$k_{uz} \leqslant 0{,}8. \tag{1.80}$$

Budući da, saglasno (1.76) i (1.78), faktor k_{uz} zavisi od impedansi $\underline{Z}_\alpha$ i $\underline{Z}_0$ koje se menjaju sa mestom kvara, strogo uzev može se govoriti samo o efikasnosti uzemljenja u pojedinim tačkama mreže. Da bi se mreža u celini mogla smatrati efikasno uzemljenom, uslov (1.80) trebalo bi da bude ispunjen u svim čvorištima mreže.

Na osnovu izraza (1.76) i (1.78) na sl. 1.14 i sl. 1.15 prikazani su dijagrami zavisnosti razmatranih odnosa napona od količnika $\frac{Z}{Z_0}$ i razlike argumenata $\varphi_\alpha - \varphi_0$, kao parametara [4,75].

Kako se vidi sa priloženih dijagrama, kritična u pogledu prenapona kod $\varphi_\alpha - \varphi_0 < 90°$ je faza koja prednjači fazi pogođenoj kvarom. U posmatranom slučaju to je faza »*c*«. Budući da su kod razlika $\varphi_\alpha - \varphi_0$ bliskih nuli imaju mali prenaponi, direktno uzemljenje, kao i uzemljenje preko male reaktanse, odlikuju se manjim stacionarnim prenaponima pri jednofaznom zemljospoju u odnosu na mreže sa uzemljenjem preko otpornika i, posebno, izolovane mreže. Naročito niski prenaponi imaju se kod direktno uzemljenih mreža zbog malih vrednosti odnosa $\frac{Z_0}{Z_\alpha}$.

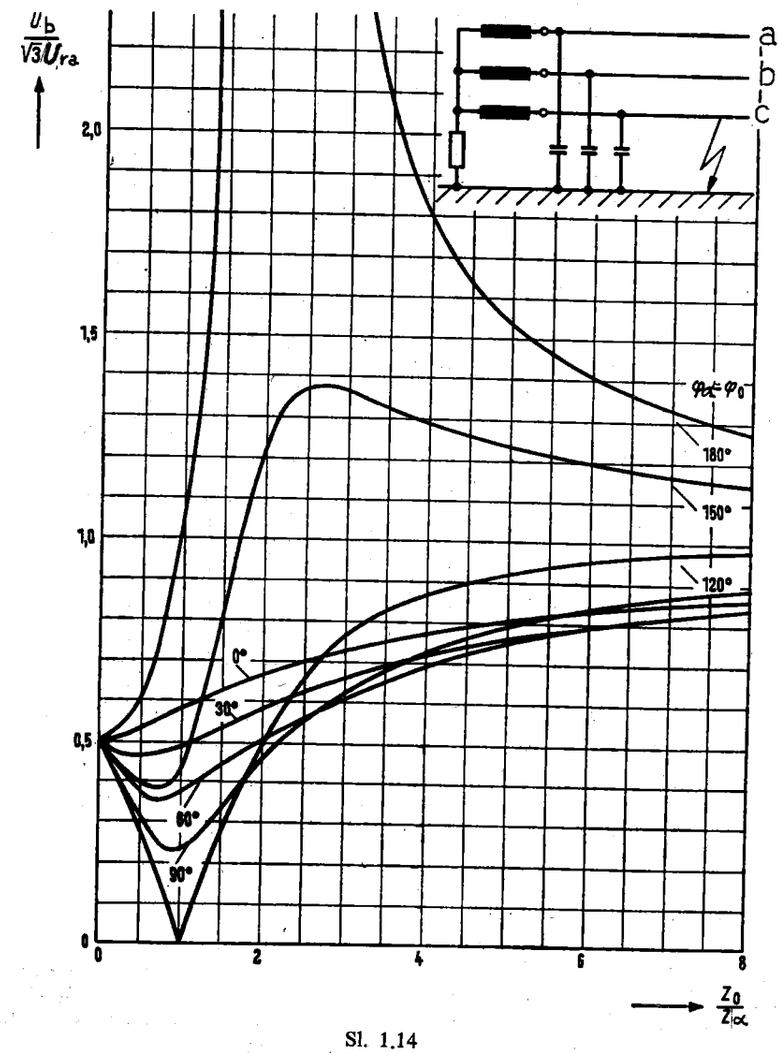
Uslov (1.80) postiže se, kako se vidi sa sl. 1.15, ako je

$$0 \leqslant \frac{Z_0}{Z_\alpha} \leqslant 3 \quad \text{pri} \quad \varphi_\alpha - \varphi_0 \leqslant 30° \tag{1.81}$$

ili

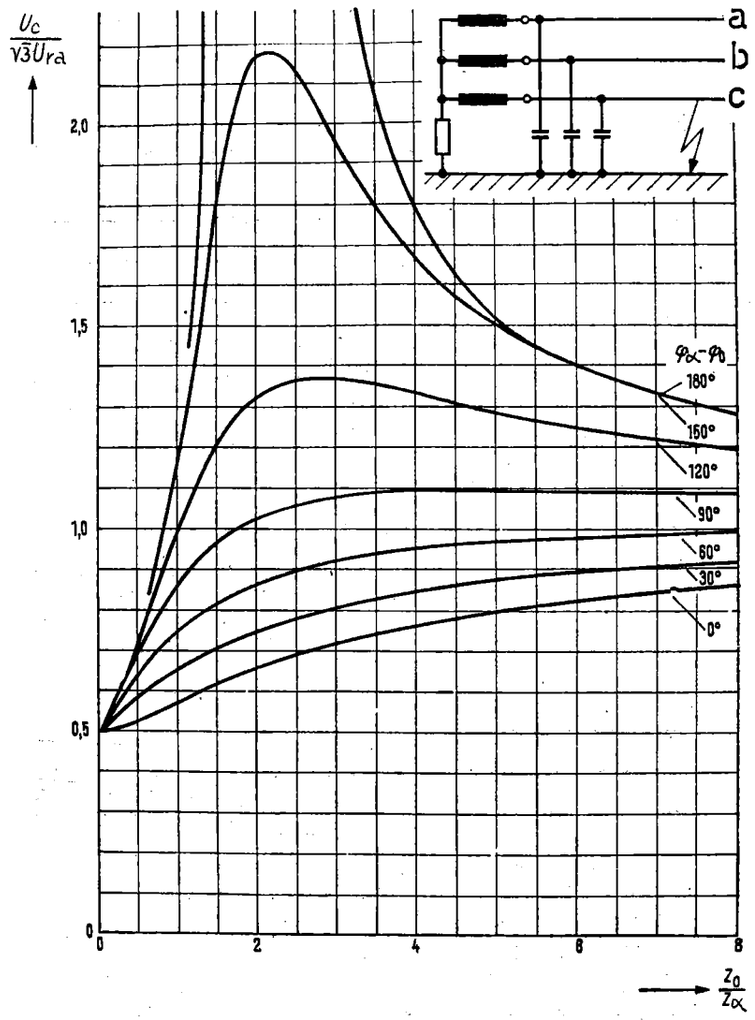
$$0 \leqslant \frac{Z_0}{Z_\alpha} \leqslant 1{,}5 \quad \text{pri} \quad \varphi_\alpha - \varphi_0 \leqslant 60° \tag{1.82}$$

Ostale vrednosti karakterističnih parametara za koje se prema sl. 1.14 i sl. 1.15 takođe može zadovoljiti (1.80), po pravilu nisu od praktičnog značaja jer se ne postižu u realnim mrežama.



Sl. 1.14

U slučaju negativnih vrednosti razlike argumenata $\varphi_\alpha - \varphi_0$, dijagrami na sl. 1.14 važe za napon faze *c*, a dijagrami na sl. 1.15, za napon faze *b*.



Sl. 1.15

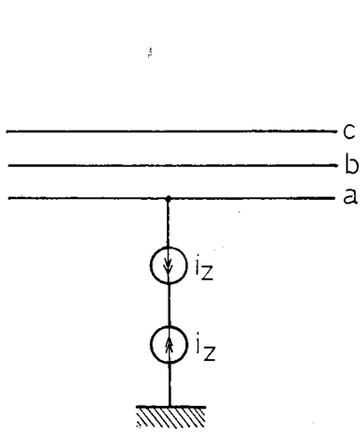
1.1.4. POVRATNI NAPON

Uslovi za gašenje struje jednofaznog zemljospoja same od sebe, posle prolaska uzroka kvara, jako zavise, pored ostalog, i od brzine kojom se, kada se struja prekine, uspostavlja napon na fazi koja je bila u kvaru. Pomenuti napon se često naziva »povratnim«, pošto teži da ponovo uspostavi zemljospoj.

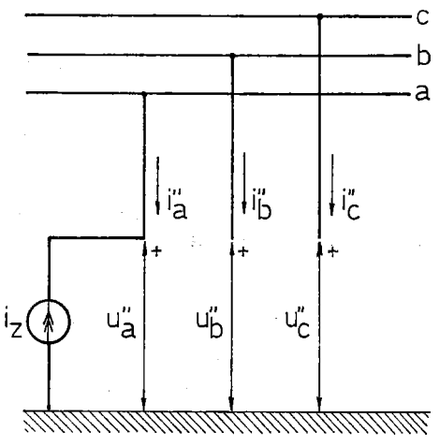
Povratni napon se takođe može relativno jednostavno analizirati primenom metode superpozicije.

Prilike na mestu kvara posle gašenja struje zemljospoja mogu se prikazati šemom na sl. 1.16. Između faze »*a*« koja je bila u kvaru i zemlje deluju dva strujna izvora sa strujama jednakim struji zemljospoja, suprotne orijentacije. Razdelimo izvore koji deluju u mreži u dve grupe: prvu, koja obuhvata sve e. m. s. izvora u mreži i strujni izvor orijentisan od provodnika »*a*« ka zemlji ($+i_z$) i drugu, koja sadrži preostali strujni izvor, usmeren od zemlje ka provodniku ($-i_z$).

Sve linearne veličine mreže mogu se i ovog puta izračunati superpozicijom komponenti koje potiču od prve i druge grupe izvora, saglasno (1.1). Pošto se prva grupa izvora poklapa sa izvorima koji se imaju u mreži sa zemljospojem, komponente v' predstavljaju vrednosti veličina mreže pri stabilnom zemljospoju. Komponente v'' prouzrokovane delovanjem strujnog izvora od zemlje ka provodniku su, prema tome, otkloni veličina mreže od vrednosti u režimu sa zemljospojem i imaju nulte početne vrednosti.



Sl. 1.16



Sl. 1.17

Pošto je u režimu sa zemljospojem napon faze »*a*« jednak nuli

$$u_a' = 0, \tag{1.83}$$

povratni napon posle gašenja struje zemljospoja je

$$u_a = u_a' + u_a'' = u_a''. \tag{1.84}$$

Kako se vidi iz (1.84), povratni napon se može izračunati samo na osnovu proučavanja veličina mreže pri delovanju strujnog izvora $-i_z$. Analizu ćemo, kao i ranije, izvesti primenom Laplasove transformacije.

Prilike na mestu kvara pri delovanju strujnog izvora $-i_z$ prikazane su šematski na sl. 1.17.

Iz slike sledi

$$\bar{I}_a'' = -\bar{I}_z \tag{1.85}$$

$$\bar{I}_b'' = 0, \tag{1.86}$$

$$\bar{I}_c'' = 0. \tag{1.87}$$

Ako se u (1.85) do (1.87) struje faza izraze preko svojih α, β, 0 komponenti, saglasno (II. 17), dobija se

$$\tilde{I}_\alpha'' + \tilde{I}_0'' = -\tilde{I}_z$$

$$-\frac{\tilde{I}_\alpha''}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{I}_\beta'' + \tilde{I}_0'' = 0 \qquad (1.88)$$

$$-\frac{\tilde{I}_\alpha''}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{I}_\beta'' + \tilde{I}_0'' = 0.$$

Iz jednačina (1.88) se izračunava

$$\tilde{I}_\alpha'' = -\frac{2}{3}\tilde{I}_z, \qquad (1.89)$$

$$\tilde{I}_\beta'' = 0, \qquad (1.90)$$

$$\tilde{I}_0'' = -\frac{1}{3}\tilde{I}_z. \qquad (1.91)$$

Na osnovu opštih jednačina mreže (1.8) do (1.10) i izraza (1.89) do (1.91) dobijaju se sledeći izrazi za α, β, 0 komponente napona na mestu kvara

$$\tilde{u}_\alpha'' = \frac{2}{3}\tilde{z}_\alpha \tilde{I}_z \qquad (1.92)$$

$$\tilde{u}_\beta'' = 0 \qquad (1.93)$$

$$\tilde{u}_0'' = \frac{1}{3}\tilde{z}_0 \tilde{I}_z. \qquad (1.94)$$

Napon faze »*a*« je prema (II. 17)

$$\tilde{u}_a'' = \tilde{u}_\alpha'' + \tilde{u}_0'' \qquad (1.95)$$

ili, saglasno sa (1.92) i (1.94),

$$\tilde{u}_a'' = \frac{\tilde{I}_z}{3}(2\tilde{z}_\alpha + \tilde{z}_0). \qquad (1.96)$$

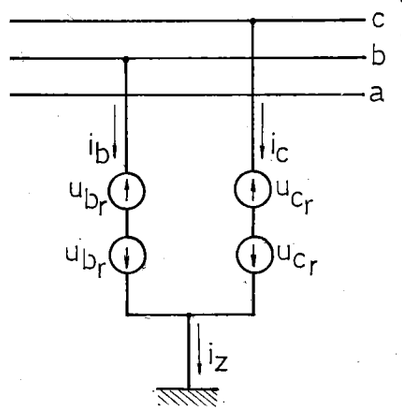
S obzirom na (1.84) $\tilde{u}_a''$ predstavlja $\mathcal{L}$ transformaciju povratnog napona tako da je

$$u_a = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{2}{3}\tilde{z}_\alpha \tilde{I}_z\right\} + \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{3}\tilde{z}_0 \tilde{I}_z\right\}. \qquad (1.97)$$

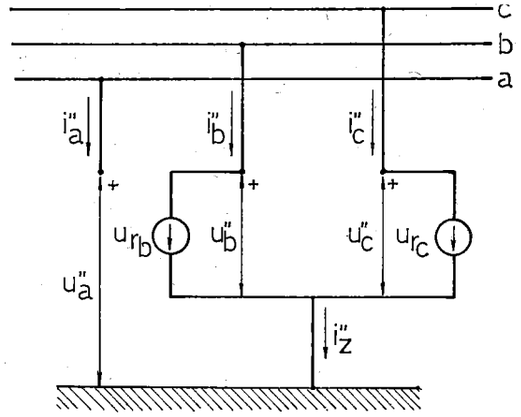
1.2. DVOFAZNI ZEMLJOSPOJ

1.2.1. OPŠTI IZRAZI ZA STRUJE I NAPONE

Dvofazni zemljospoj može se prikazati šematski kao na sl. 1.18. Na spojevima faza »*b*« i »*c*« vezane su na red, u opoziciji, e. m. s. po vrednosti jednake naponima faza u režimu bez kvara.



Sl. 1.18



Sl. 1.19

Slično kao ranije, e. m. s. mreže mogu se rastaviti u dve grupe tako da prva obuhvata sve e. m. s. izvora napajanja i e. m. s. $+u_{br}$ i $+u_{cr}$, a druga, dve preostale e. m. s., $-u_{br}$ i $-u_{cr}$. Komponente *v'* veličina mreže koje potiču od prve grupe e. m. s. poklapaju se sa veličinama režima mreže bez kvara, tako da su po pravilu poznate i nije ih potrebno računati. Komponente *v''* izračunavaju se iz šeme mreže sa e. m. s. $-u_{br}$ i $-u_{cr}$, sa nultim početnim uslovima.

Odnosi na mestu kvara kod proračuna razmatranih komponenti prikazani su na sl. 1.19.

Prema slici je:

$$i_a'' = 0, \qquad (1.98)$$

$$u_b'' = -u_{rb}, \qquad (1.99)$$

$$u_c'' = -u_{rc}. \qquad (1.100)$$

Analizu ćemo izvesti razlaganjem veličina faza na α, β, 0 komponente, uz primenu Laplasove transformacije.

Ako se u (1.98) do (1.100) fazne veličine izraze preko svojih α, β, 0 komponenata, saglasno (II. 17), dolazi se do sledećih izraza

$$\tilde{I}_\alpha'' + \tilde{I}_0'' = 0, \qquad (1.101)$$

$$-\frac{\tilde{u}_\alpha''}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{u}_\beta'' + \tilde{u}_0'' = -\tilde{u}_{rb}, \qquad (1.102)$$

$$-\frac{\tilde{u}_\alpha''}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{u}_\beta'' + \tilde{u}_0'' = -\tilde{u}_{rc}. \qquad (1.103)$$

Veze (1.101) do (1.103), zajedno sa opštim jednačinama mreže (1.8) do (1.10), omogućavaju izračunavanje svih komponenata napona i struja.

Oduzimanjem (1.103) od (1.102) jednostavno se odmah dobija

$$\tilde{u}_\beta'' = \frac{\tilde{u}_{rc} - \tilde{u}_{rb}}{\sqrt{3}}. \tag{1.104}$$

Saglasno (1.9), kada se ima u vidu (II. 21), je onda

$$\tilde{i}_\beta'' = \frac{\tilde{u}_{rb} - \tilde{u}_{rc}}{\sqrt{3}\,\tilde{z}_\alpha}. \tag{1.105}$$

Sabiranjem (1.102) i (1.103) dobija se

$$-\tilde{u}_\alpha'' + 2\,\tilde{u}_0'' = -(\tilde{u}_{rb} + \tilde{u}_{rc}). \tag{1.106}$$

Iz (1.106) se na osnovu (1.101) i (1.8) i (1.10) izračunava

$$\tilde{i}_\alpha'' = -\frac{\tilde{u}_{rb} + \tilde{u}_{rc}}{\tilde{z}_\alpha + 2\,\tilde{z}_0}, \tag{1.107}$$

$$\tilde{i}_0'' = \frac{\tilde{u}_{rb} + \tilde{u}_{rc}}{\tilde{z}_\alpha + 2\,\tilde{z}_0}, \tag{1.108}$$

$$\tilde{u}_\alpha'' = \frac{\tilde{z}_\alpha}{\tilde{z}_\alpha + 2\,\tilde{z}_0}(\tilde{u}_{rb} + \tilde{u}_{rc}), \tag{1.109}$$

$$\tilde{u}_0'' = -\frac{\tilde{z}_0}{\tilde{z}_\alpha + 2\,\tilde{z}_0}(\tilde{u}_{rb} + \tilde{u}_{rc}). \tag{1.110}$$

Saglasno definicionim relacijama (II. 17) napon $\tilde{u}_a''$ je

$$\tilde{u}_a'' = \tilde{u}_\alpha + \tilde{u}_0'',$$

odnosno, s obzirom na (1.109) i (1.110),

$$\tilde{u}_a'' = \frac{\tilde{z}_\alpha - \tilde{z}_0}{\tilde{z}_\alpha + 2\,\tilde{z}_0}(\tilde{u}_{rb} + \tilde{u}_{rc}). \tag{1.111}$$

Napon ispravne faze »*a*« je prema tome, saglasno pravilima superpozicije,

$$u_a = u_{ar} + \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{\tilde{z}_0 - \tilde{z}_\alpha}{\tilde{z}_\alpha + 2\,\tilde{z}_0}(\tilde{u}_{rb} + \tilde{u}_{rc})\right\}. \tag{1.112}$$

Struje su prema (II. 17) jednake

$$\tilde{i}_b'' = -\frac{\tilde{i}_\alpha''}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{i}_\beta'' + \tilde{i}_0'' \tag{1.113}$$

$$\tilde{i}_c'' = -\frac{\tilde{i}_\alpha''}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{i}_\beta'' + \tilde{i}_0''. \tag{1.114}$$

Kada se u (1.113) i (1.114) α, β, 0 komponente struja zamene prema (1.105), (1.107) i (1.108), dobija se, posle sređivanja,

$$\tilde{i}_b'' = \frac{3}{2}\frac{\tilde{u}_{rb} + \tilde{u}_{rc}}{2\,\tilde{z}_0 + \tilde{z}_\alpha} + \frac{\tilde{u}_{rb} - \tilde{u}_{rc}}{2\,\tilde{z}_\alpha}, \tag{1.115}$$

$$\tilde{i}_c'' = \frac{3}{2}\frac{\tilde{u}_{rb} + \tilde{u}_{rc}}{2\,\tilde{z}_0 + \tilde{z}_\alpha} - \frac{\tilde{u}_{rb} - \tilde{u}_{rc}}{2\,\tilde{z}_\alpha}. \tag{1.116}$$

Pošto u režimu bez zemljospoja struje kroz mesto kvara ne teku, biće

$$i_b' = i_c' = 0,$$

tako da se za struje kvara ima

$$i_b = \mathcal{L}^{-1}\{\tilde{i}_b''\}, \tag{1.117}$$

$$i_c = \mathcal{L}^{-1}\{\tilde{i}_c''\}. \tag{1.118}$$

Struja i_z'' koja se na mestu kvara odvodi u zemlju jednaka je prema sl. 1.18

$$i_z = i_b + i_c. \tag{1.119}$$

Na osnovu (1.117) i (1.118) ova se struja može izračunati neposredno iz izraza

$$i_z = \mathcal{L}^{-1}\{\tilde{i}_b'' + \tilde{i}_c''\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{3\,\frac{\tilde{u}_{rb} + \tilde{u}_{rc}}{2\,\tilde{z}_o + \tilde{z}_\alpha}\right\}. \tag{1.120}$$

1.2.2. STACIONARNE VREDNOSTI

Kompleksna amplituda napona ispravne faze, s obzirom na (1.111) i (1.112) i analogiju sa $\mathcal{L}$ transformacijama, određena je izrazom

$$\underline{U}_a = \underline{U}_{ra} + \frac{\underline{Z}_\alpha - \underline{Z}_o}{\underline{Z}_\alpha + 2\,\underline{Z}_o}(\underline{U}_{rb} + \underline{U}_{rc}). \tag{1.121}$$

Kada se ima u vidu da je

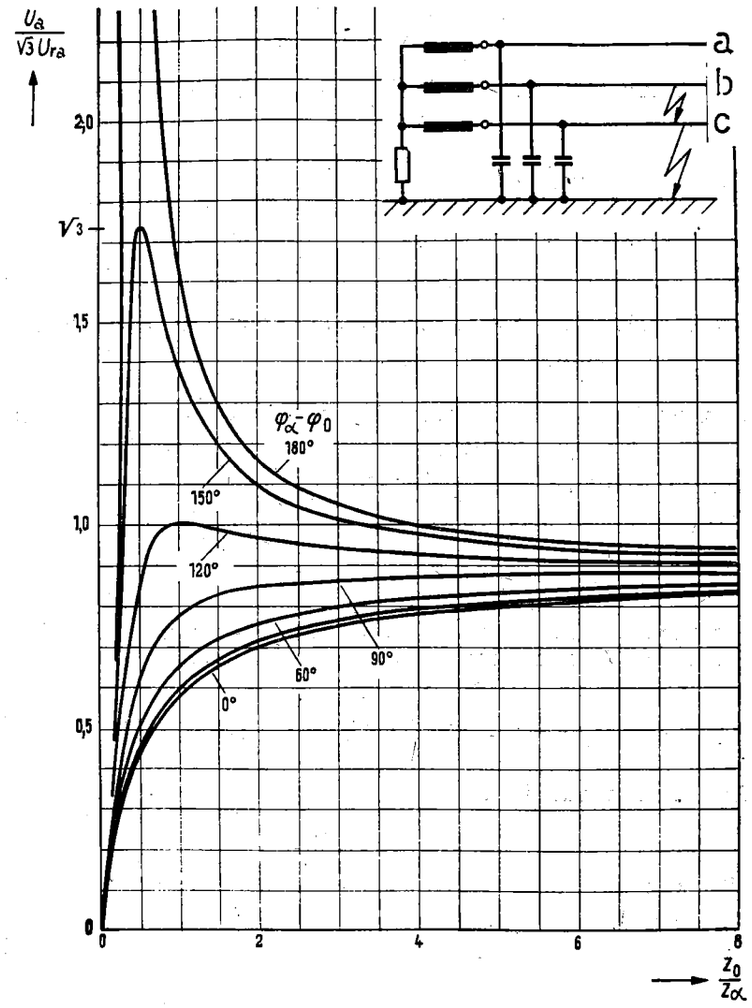
$$\underline{U}_{br} + \underline{U}_{cr} = -\underline{U}_{ra}, \tag{1.122}$$

izraz (1.121) postaje

$$\underline{U}_a = \frac{3\,\underline{Z}_o}{\underline{Z}_\alpha + 2\,\underline{Z}_o}\underline{U}_{ra}. \tag{1.123}$$

Na sl. 1.20 prikazan je odnos $\frac{U_a}{\sqrt{3}\,U_{ra}}$ kao funkcija $\frac{Z_o}{Z_\alpha}$ za različite razlike argumenata $\varphi_\alpha - \varphi_0$ navedenih impedansi [4,75]. Beskonačno velika vrednost napona ima se u slučaju $\varphi_\alpha - \varphi_0 = 180°$ i $\frac{Z_0}{Z_\alpha} = 0{,}5$. Navedena ugaona razlika mogla bi se, uz zanemarenje otpornosti elemenata mreže, imati kod mreža sa izolovanom neutralnom

tačkom. U praktičnim uslovima, međutim, odnos $\frac{Z_0}{Z_\alpha}$ znatno je veći od navedene kritične vrednosti, naročito kod kompenzovanih i izolovanih mreža, tako da napon ispravne faze obično ne prevazilazi vrednost $\frac{\sqrt{3}}{2} U_{ra}$.



Sl. 1.20

Na osnovu (1.115) i (1.117) kompleksna amplituda stacionarne struje kvara faze »*b*« iznosi

$$\underline{I}_b = \frac{3}{2} \frac{\underline{U}_{rb} + \underline{U}_{rc}}{\underline{Z}_\alpha + 2\underline{Z}_0} + \frac{\underline{U}_{rb} - \underline{U}_{rc}}{2\underline{Z}_\alpha}. \tag{1.124}$$

Ako se ima u vidu (1.121), kao i da je

$$\underline{U}_{rb} = \underline{U}_{ra} e^{-j\frac{2\pi}{3}}, \qquad \underline{U}_{rc} = \underline{U}_{ra} e^{j\frac{2\pi}{3}}, \tag{1.125}$$

iz (1.124) se, posle sređivanja, dobija

$$\underline{I}_b = -j\underline{U}_{ar} \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{1}{\underline{Z}_\alpha} - j \frac{\sqrt{3}}{\underline{Z}_\alpha + 2\underline{Z}_0} \right). \tag{1.126}$$

Odnos efektivnih vrednosti struje i_b i struje trofaznog kratkog spoja na istom mestu jednak je, saglasno (1.73) i (1.126),

$$\frac{I_b}{I_{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left| 1 - j \frac{\sqrt{3}}{1 + 2\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}} \right|. \tag{1.127}$$

Kompleksna amplituda struje i_c jednaka je, kada se ima u vidu (1.118) i (1.116);

$$\underline{I}_c = \frac{3}{2} \frac{\underline{U}_{rb} + \underline{U}_{rc}}{\underline{Z}_\alpha + 2\underline{Z}_0} - \frac{\underline{U}_{rb} - \underline{U}_{rc}}{2\underline{Z}_\alpha}. \tag{1.128}$$

Pošto se $\underline{I}_c$ razlikuje od $\underline{I}_b$ samo po znaku drugog člana, na osnovu (1.128) i (1.127) može se odmah pisati

$$\underline{I}_c = j\underline{U}_{ra} \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{1}{\underline{Z}_\alpha} + \frac{j\sqrt{3}}{\underline{Z}_\alpha + 2\underline{Z}_0} \right) \tag{1.129}$$

i

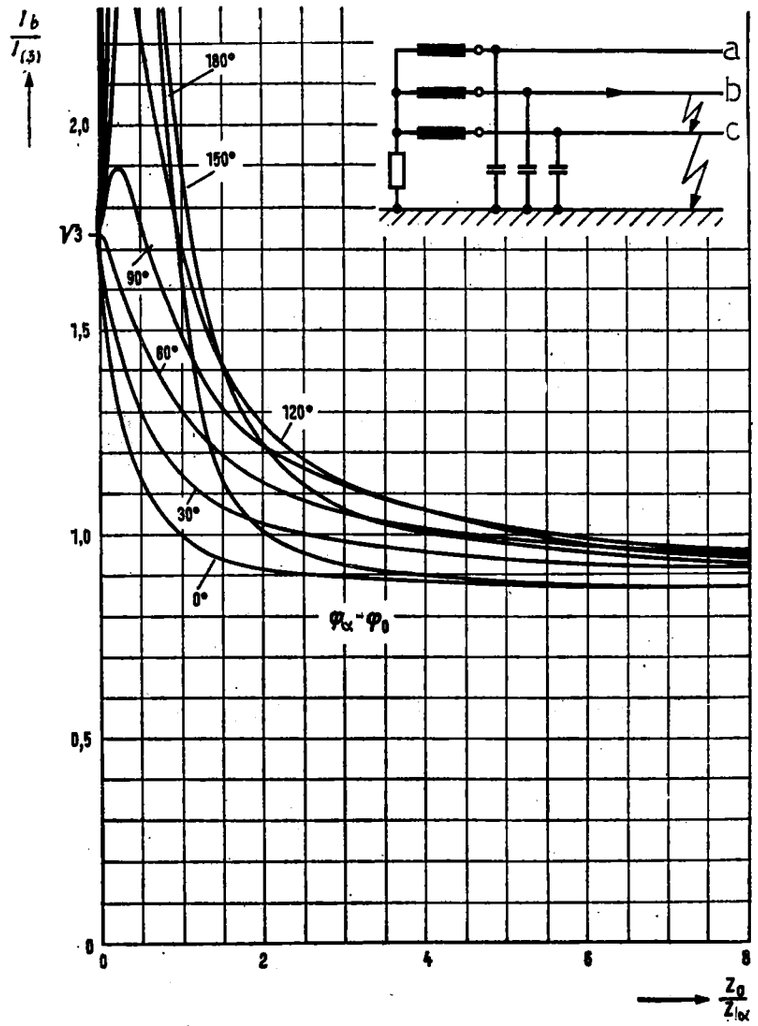
$$\frac{I_c}{I_{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left| 1 + j \frac{\sqrt{3}}{1 + 2\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}} \right|. \tag{1.130}$$

Odnosi (1.127) i (1.130) prikazani su na sl. 1.21 i 1.22 takođe kao funkcije $\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}$ za različite vrednosti $\varphi_\alpha - \varphi_0$ [4,75].

Kako se vidi iz prikazanih dijagrama, kod vrednosti $\varphi_\alpha - \varphi_0 < 90°$ koje su karakteristične za direktno uzemljenje mreže i mreže uzemljene preko male impedanse, veće struje imaju se u fazi koja fazno sledi ispravnoj fazi, što je u razmatranom slučaju faza »*b*«.

Ovo isto važi i za pojedine veće vrednosti $\varphi_\alpha - \varphi_0$, kojima se inače odlikuju izolovane mreže. Kompenzovane mreže, zavisno od načina podešenja prigušnice, mogu da imaju razliku argumenata manju ili veću od 90°.

Mali odnosi $\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}$ karakteristični su za direktno uzemljene mreže i mreže uzemljene preko male impedanse, kako je već ranije rečeno. Kod izolovanih i kom-

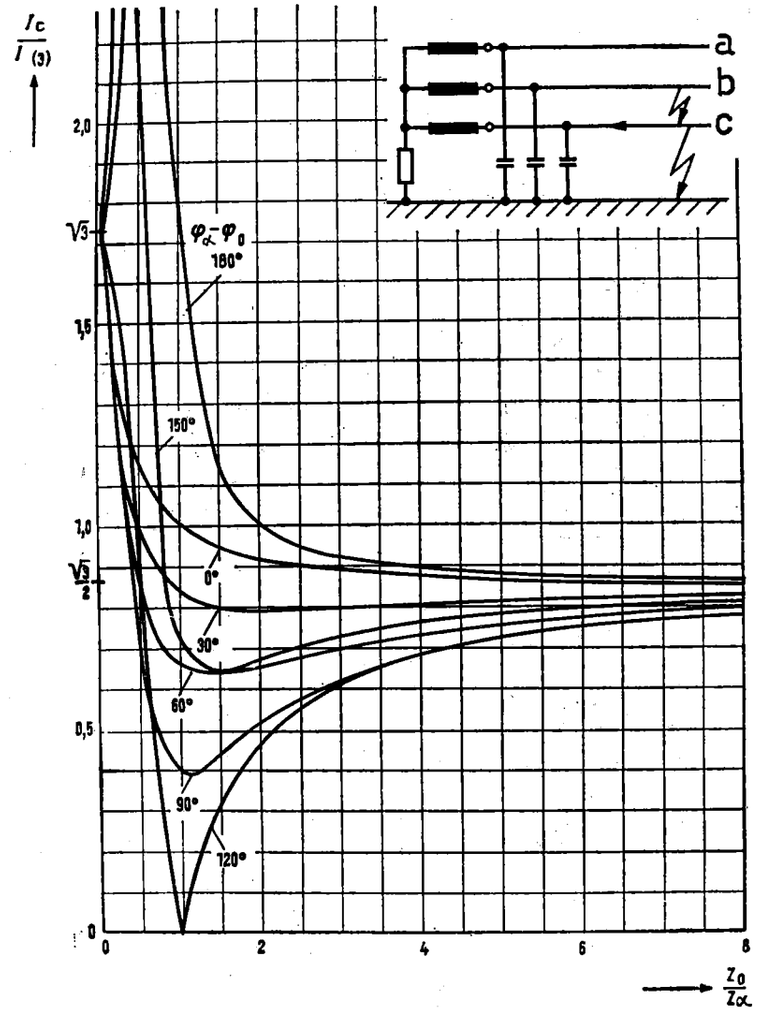


Sl. 1.21

penzovanih mreža se, zbog velikih vrednosti Z_0 odnosno velikih impedansi na putevima struje preko zemlje, dvofazni zemljospoj približava dvofaznom kratkom spoju. Za pomenuti kvar je

$$\frac{I_b}{I_{(3)}} = \frac{I_c}{I_{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2}. \tag{1.131}$$

Navedenoj vrednosti teže kod velikih $\frac{Z_0}{Z_\alpha}$ krive na sl. 1.21 i sl. 1.22.



Sl. 1.22

U slučaju negativnih vrednosti $\varphi_\alpha - \varphi_0$, dijagrami na sl. 1.21 odnose se na struju $\underline{I}_c$, a dijagrami na sl. 1.22, na struju $\underline{I}_b$.

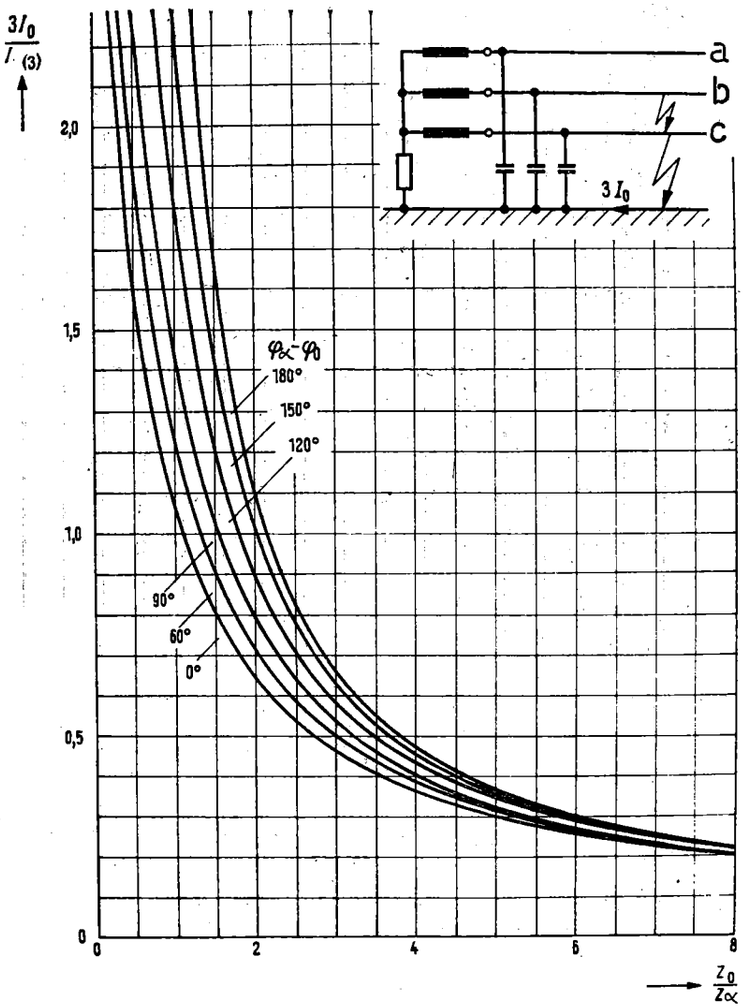
Stacionarne vrednosti struje kvara koja se vraća ka uzemljivaču napojnog postrojenja preko zemlje jednaka je, u skladu sa (1.120),

$$\underline{I}_z = 3\,\frac{\underline{U}_{rb} + \underline{U}_{rc}}{\underline{Z}_\alpha + 2\,\underline{Z}_0}. \tag{1.132}$$

S obzirom na (1.122) i (1.73) iz (1.132) sledi

$$\frac{I_z}{I_{(3)}} = \frac{3}{\left|1+2\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_\alpha}\right|}. \qquad (1.133)$$

Na sl. 1.23 prikazana je grafički zavisnost razmatranog odnosa struja od količnika $\frac{Z_0}{Z_\alpha}$ za različite vrednosti $\varphi_\alpha - \varphi_0$ [4,75].



Sl. 1.23

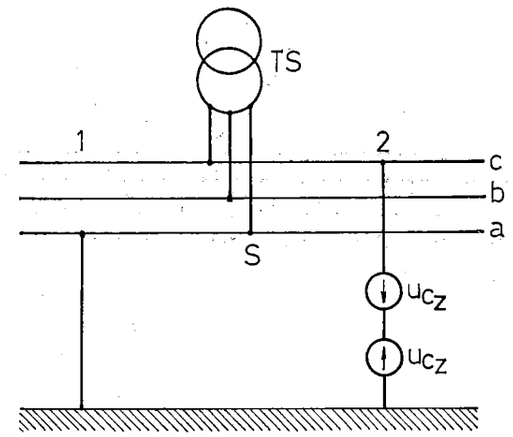
1.3. DVOSTRUKI ZEMLJOSPOJ

1.3.1. OPŠTI IZRAZI ZA STRUJE KVARA

Pod dvostrukim zemljospojem podrazumeva se istovremeni zemljospoj dveju faza mreže na različitim mestima.

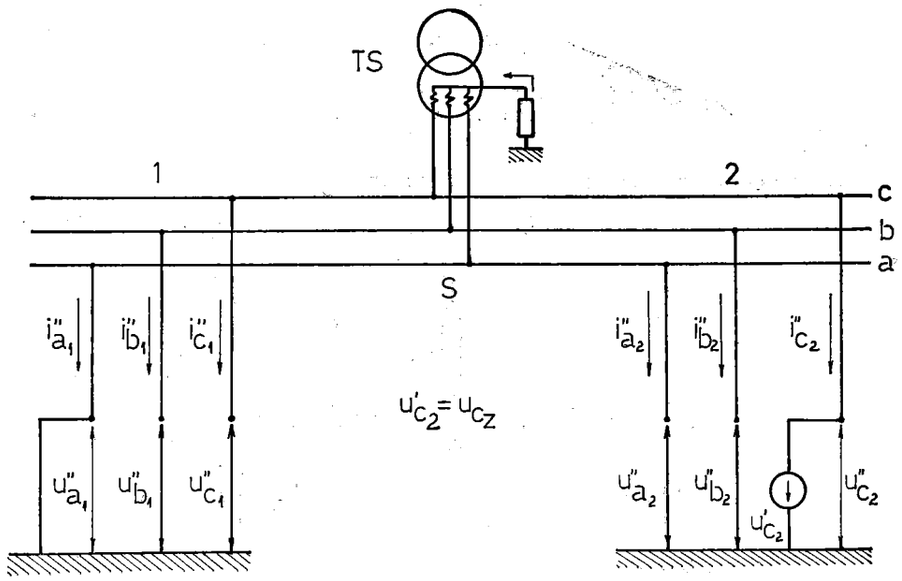
Pretpostavimo da je prvo došlo do zemljospoja faze »*a*« na mestu 1, a zatim na jednoj od ispravnih faza, na primer „*c*“, na mestu 2 (sl. 1.24).

Zemljospoj faze »*c*« može se prikazati preko dve na red vezane, suprotno orijentisane e. m. s. po vrednosti jednake naponu faze »*c*« u režimu bez zemljospoja na mestu 2. Na ovaj se način kvar može analizirati primenom metode superpozicije, saglasno (1.1), gde se komponente v'', uslovljene delovanjem e. m. s. u_{cz}, superponiraju na vrednosti odgovarajućih veličina u režimu bez zemljospoja na mestu 2. Komponente v' predstavljaju, prema tome, vrednosti veličina mreže pri zemljospoju na mestu 1 i mogu se izračunati kako je pokazano u 1.1.



Sl 1.24

Na sl. 1.25 prikazane su šematski prilike na mestima nesimetrije kod proračuna komponenti v''.



Sl. 1.25

Kako se sa sl. 1.25 vidi, na mestu 1 je

$$u_{a1}'' = 0, \tag{1.134}$$

$$i_{b1}'' = 0, \tag{1.135}$$

$$i_{c1}'' = 0, \tag{1.136}$$

a na mestu 2

$$i_{a2}'' = 0, \tag{1.137}$$

$$i_{b2}'' = 0, \tag{1.138}$$

$$u_{c2}'' = -u_{c2}'. \tag{1.139}$$

Analizu režima ćemo, kao i ranije, izvesti zamenom faznih veličina α, β, 0 komponentama i primenom Laplasove transformacije.

Iz relacije (1.134) do (1.136), saglasno (II. 17), dolazi se do sledećih veza između α, β, 0 komponenti veličina na mestu 1

$$\tilde{u}_{\alpha 1}'' + \tilde{u}_{01}'' = 0, \tag{1.140}$$

$$\check{I}_{\beta 1}'' = 0, \tag{1.141}$$

$$\check{I}_{01}'' = \frac{\check{I}_{\alpha 1}''}{2}. \tag{1.142}$$

Kada se veličine u relacijama (1.137) do (1.139) izraze preko svojih α, β, 0 komponenti, dobija se

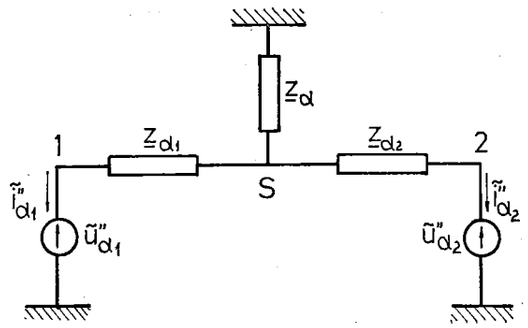
$$\check{I}_{\alpha 2}'' + \check{I}_{02}'' = 0, \tag{1.143}$$

$$-\frac{\check{I}_{\alpha 2}''}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\check{I}_{\beta 2}'' + \check{I}_{02}'' = 0, \tag{1.144}$$

$$-\frac{\tilde{u}_{\alpha 2}''}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{u}_{\beta 2}'' + \tilde{u}_{02}'' = -\tilde{u}_{c2}'. \tag{1.145}$$

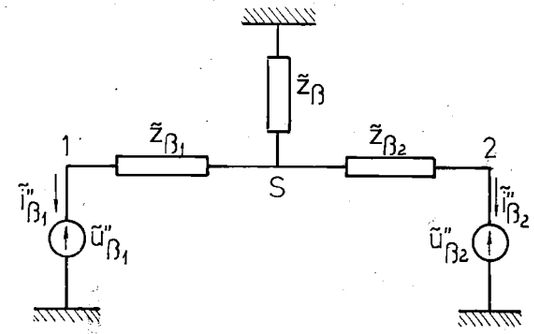
Iz (1.144) se, s obzirom na (1.143) izračunava

$$\check{I}_{\beta 2}'' = \sqrt{3}\,\check{I}_{\alpha 2}''. \tag{1.146}$$

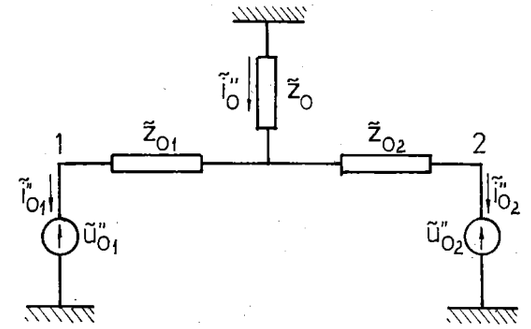


Sl. 1.26

Veze između α, β, 0 komponenti veličina na mestima nesimetrije, koje se uspostavljaju preko mreže, određuju se iz jednopolnih zamenskih šema mreže za odgovarajuće redoslede (Prilog II). Šeme α, β i 0 redosleda razmatrane mreže prikazane su na sl. 1.26, 1.27 i 1.28.



Sl. 1.27



Sl. 1.28

Indeksima 1 i 2 označene su operatorske impedanse elemenata mreže od mesta kvara 1 i 2 do tačke napajanja *S*, respektivno. Impedanse izvora obuhvataju transformator i napojnu mrežu, a u nultom redosledu i impedansu uzemljenja neutralne tačke (njenu trostruku vrednost). Ove impedanse označene su samo indeksima za odgovarajuće redoslede.

Iz šema se očitavaju sledeće relacije

$$\tilde{u}_{\alpha 1}'' = -(\tilde{z}_{\alpha 1} + \tilde{z}_{\alpha})\,\check{I}_{\alpha 1}'' - \tilde{z}_{\alpha}\,\check{I}_{\alpha 2}'', \tag{1.147}$$

$$\tilde{u}_{\alpha 2}'' = -\tilde{z}_{\alpha}\,\check{I}_{\alpha 1}'' - (\tilde{z}_{\alpha 2} + \tilde{z}_{\alpha})\,\check{I}_{\alpha 2}'', \tag{1.148}$$

$$\tilde{u}_{\beta 1}'' = -(\tilde{z}_{\beta 1} + \tilde{z}_{\beta})\,\check{I}_{\beta 1}'' - \tilde{z}_{\beta}\,\check{I}_{\beta 2}'', \tag{1.149}$$

$$\tilde{u}_{\beta 2}'' = -\tilde{z}_{\beta}\,\check{I}_{\beta 1}'' - (\tilde{z}_{\beta 2} + \tilde{z}_{\beta})\,\check{I}_{\beta 2}'', \tag{1.150}$$

$$\tilde{u}_{01}'' = -(\tilde{z}_{01} + \tilde{z}_{0})\,\check{I}_{01}'' - \tilde{z}_{0}\,\check{I}_{02}'', \tag{1.151}$$

$$\tilde{u}_{02}'' = -\tilde{z}_{0}\,\check{I}_{01}'' - (\tilde{z}_{02} + \tilde{z}_{0})\,\check{I}_{02}'', \tag{1.152}$$

Relacije (1.140) do (1.152) omogućavaju proračun svih komponenata na mestima nesimetrije.

Pretpostavićemo, kao i ranije, da su α i β impedanse elemenata mreže jednake. Zamenom $\tilde{I}_{01}''$ i $\tilde{I}_{02}''$ u (1.151) prema (1.142) i (1.143) dolazi se do veze

$$\tilde{U}_{01}'' = -\frac{1}{2}(\tilde{Z}_{01}+\tilde{Z}_0)\,\tilde{I}_{\alpha 1}'' + \tilde{Z}_0\,\tilde{I}_{\alpha 2}''. \tag{1.153}$$

S obzirom na (1.147) i (1.153) relacija (1.140) dobija oblik, posle sređivanja,

$$\tilde{I}_{\alpha 1}''\,[2\,(\tilde{Z}_{\alpha 1}+\tilde{Z}_\alpha)+\tilde{Z}_{01}+\tilde{Z}_0] - 2\,(\tilde{Z}_0-\tilde{Z}_\alpha)\,\tilde{I}_{\alpha 2}'' = 0. \tag{1.154}$$

Na osnovu (1.150), (1.141) i (1.146) dobija se

$$\tilde{U}_{\beta 2}'' = -3\,(\tilde{Z}_{\alpha 2}+\tilde{Z}_\alpha)\,\tilde{I}_{\alpha 2}''. \tag{1.155}$$

Iz (1.152), (1.142) i (1.143) sledi

$$\tilde{U}_{02}'' = -\frac{\tilde{Z}_0}{2}\tilde{I}_{\alpha 1}'' + (\tilde{Z}_{02}+\tilde{Z}_0)\,\tilde{I}_{\alpha 2}''. \tag{1.156}$$

S obzirom na (1.148), (1.155) i (1.156), iz (1.145) se dolazi do relacije

$$\frac{1}{2}(\tilde{Z}_0-\tilde{Z}_\alpha)\,\tilde{I}_{\alpha 1}'' - [2\,(\tilde{Z}_{\alpha 2}+\tilde{Z}_\alpha)+\tilde{Z}_{02}+\tilde{Z}_0]\,\tilde{I}_{\alpha 2}'' = \tilde{U}_{c2}'. \tag{1.157}$$

Jednačine (1.154) i (1.157) omogućavaju izračunavanje struja $\tilde{I}_{\alpha 1}''$ i $\tilde{I}_{\alpha 2}''$. Rešavanjem pomenutih jednačina dobija se

$$\tilde{I}_{\alpha 1}'' = 2\,(\tilde{Z}_0-\tilde{Z}_\alpha)\frac{\tilde{U}_{c2}'}{\tilde{D}}, \tag{1.158}$$

$$\tilde{I}_{\alpha 2}'' = [2(\tilde{Z}_{\alpha 1}+\tilde{Z}_\alpha)+\tilde{Z}_{01}+\tilde{Z}_0]\frac{\tilde{U}_{c2}'}{\tilde{D}}, \tag{1.159}$$

gde smo označili

$$\tilde{D} = [2\,(\tilde{Z}_{\alpha 1}+\tilde{Z}_\alpha)+\tilde{Z}_{01}+\tilde{Z}_0]\,[2\,\tilde{Z}_{\alpha 2}+\tilde{Z}_\alpha)+\tilde{Z}_{02}+\tilde{Z}_0] - (\tilde{Z}_0-\tilde{Z}_\alpha)^2. \tag{1.160}$$

Struja kvara na mestu 1 (sl. 1.25) jednaka je, saglasno (II. 17),

$$\tilde{I}_{a1}'' = \tilde{I}_{\alpha 1}'' + \tilde{I}_{01}''. \tag{1.61}$$

S obzirom na (1.158) i (1.142), iz (1.161) se dobija

$$\tilde{I}_{a1}'' = (3\,\tilde{Z}_0-\tilde{Z}_\alpha)\frac{\tilde{U}_{c2}'}{\tilde{D}}. \tag{1.162}$$

Stvarna struja kvara na mestu 1 dobija se superpozicijom struje (1.162) i struje i_{a1}' koja kroz mesto kvara teče kada nema zemljospoja na mestu 2, u skladu sa (1.1). Tako je

$$i_{a1} = i_{a1}' + \mathcal{L}^{-1}\{\tilde{I}_{a1}''\}. \tag{1.163}$$

Struja kvara na mestu 2 (sl. 1.25) je, prema (II. 17),

$$\tilde{I}_{c2}'' = -\frac{\tilde{I}_{\alpha 2}''}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{I}_{\beta 2}'' + \tilde{I}_{02}''. \tag{1.164}$$

Kada se ima u vidu (1.159), (1.146) i (1.143), iz (1.164) se izračunava

$$\tilde{I}_{c2}'' = -\frac{3}{\tilde{D}}[2\,(\tilde{Z}_{\alpha 1}+\tilde{Z}_\alpha)+\tilde{Z}_{01}+\tilde{Z}_0]\,\tilde{U}_{c2}'. \tag{1.165}$$

Pošto je u režimu bez zemljospoja na mestu 2 struja na pomenutom mestu

$$i_{c2}' = 0,$$

stvarna struja dvostrukog zemljospoja poklapa se sa komponentom i_{c2}''. Tako se ima

$$i_{c2} = \mathcal{L}^{-1}\{\tilde{I}_{c2}''\}. \tag{1.166}$$

Za praktična razmatranja značajna je i struja i_N koja protiče kroz impedansu u neutralnoj tački napojnog transformatora, ako ova nije izolovana (sl. 1.25).

Vrednost pomenute struje kod delovanja e. m. s. $-u_{cz}$ jednaka je (sl. 1.28)

$$\tilde{I}_N'' = 3\,\tilde{I}_0'' = 3\,(\tilde{I}_{01}''+\tilde{I}_{02}''). \tag{1.167}$$

Struje $\tilde{I}_{01}''$ i $\tilde{I}_{02}''$ mogu se izračunati na osnovu (1.142), (1.143), (1.158) i (1.159). Posle sređivanja se dobija

$$\tilde{I}_N'' = -\frac{3}{\tilde{D}}(3\,\tilde{Z}_\alpha + 2\,\tilde{Z}_{\alpha 1}+\tilde{Z}_{01})\,\tilde{U}_{c2}'. \tag{1.168}$$

Stvarna struja kroz impedansu u neutralnoj tački je

$$i_N = i_N' + \mathcal{L}^{-1}\{\tilde{I}_N''\}, \tag{1.169}$$

gde smo sa i_N' označili pomenutu struju u režimu bez zemljospoja na mestu 2.

1.3.2. STACIONARNE VREDNOSTI STRUJE KVARA

Kompleksna amplituda struje dvostrukog zemljospoja na mestu 2 jednaka je, saglasno (1.165) i (1.166), kada se koristi formalna analogija sa $\mathcal{L}$-transformacijama,

$$\underline{I}_{c2} = -\frac{3}{\underline{D}}[2\,(\underline{Z}_{\alpha 1}+\underline{Z}_\alpha)+\underline{Z}_{01}+\underline{Z}_0]\,\underline{U}_{c2}' \tag{1.170}$$

Za praktična razmatranja posebno je interesantna struja dvostrukog zemljospoja u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom, gde su ovakvi kvarovi najverovatniji. Struja u pomenutom slučaju dobija se kao granična vrednost izraza (1.170)

$$\underline{I}_{c2} = \lim_{Z_0\to\infty}\underline{I}_{c2} \tag{1.171}$$

S obzirom na (1.170) i (1.160), relacija (1.171) daje, posle sređivanja,

$$\underline{I}_{c2} = -\frac{3\,\underline{U}'_{c2}}{2\,\underline{Z}_\alpha + \frac{1}{3}(2\,\underline{Z}_{\alpha 1} + \underline{Z}_{01} + 2\,\underline{Z}_{\alpha 2} + \underline{Z}_{02})}. \tag{1.172}$$

Ako vodovi do mesta kvara 1 i 2 imaju jednake električne parametre, izraz (1.172) može se dovesti na jednostavniji oblik

$$\underline{I}_{c2} = -\frac{\underline{U}'_{c2}}{2\,\underline{Z}_\alpha + \frac{2\,\underline{z}_\alpha + \underline{z}_0}{3}\,l}, \tag{1.173}$$

gde

$$l = l_1 + l_2$$

predstavlja ukupnu dužinu vodova između mesta 1 i 2, a $\underline{z}_\alpha$ i $\underline{z}_0$ impedanse vodova za α i 0 redosled po jedinici dužine.

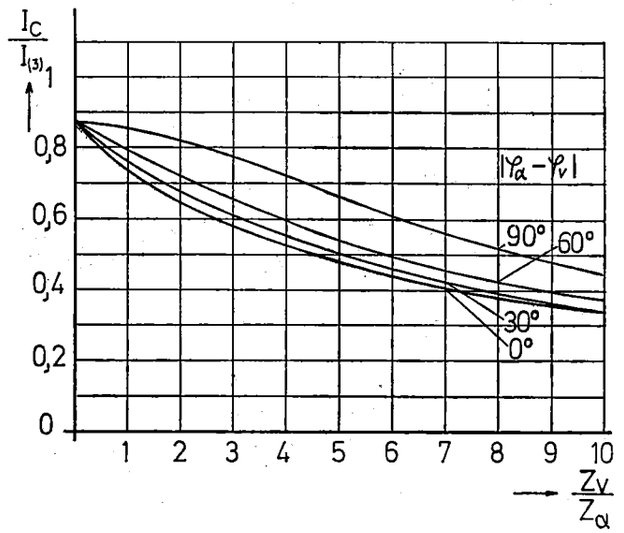
Umesto apsolutnih vrednosti struje kvara podesnije je analizirati odnos pomenute vrednosti prema struji trofaznog kratkog spoja na napojnim sabirnicama.

Kako je

$$\frac{U'_{c2}}{U_{ra}} \approx \sqrt{3},$$

na osnovu (1.173) i (1.73) ima se

$$\frac{I_{c2}}{I_{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{\left|2 + \frac{(2\,\underline{z}_\alpha + \underline{z}_0)\,l}{3\,\underline{Z}_\alpha}\right|}. \tag{1.174}$$



Sl. 1.29

Odnos $\frac{I_{c2}}{I_{(3)}}$ prikazan je na sl. 1.29 u vidu dijagrama kao funkcija odnosa impedansi $\frac{\underline{Z}_v}{\underline{Z}_\alpha}$. Sa $\underline{Z}_v$ označena je ekvivalentna impedansa vodova između mesta kvara

$$\underline{Z}_v = (2\,\underline{Z}_\alpha + \underline{Z}_0) \tag{1.175}$$

Krive su nacrtane za nekoliko razlika $|\varphi_\alpha - \varphi_v|$ argumenata impedansi $\underline{Z}_v$ i $\underline{Z}_\alpha$.

Razlike argumenata impedansi reda su $60° \div 90°$ kod kablovskih, a $0° \div 30°$ kod vazdušnih vodova.

Struje dvostrukog zemljospoja imaju veće vrednosti što su mesta kvarova bliža, tj. $\frac{\underline{Z}_v}{\underline{Z}_\alpha}$ manje, težeći ka vrednostima koje dostižu kod dvofaznih zemljospojeva. Ove poslednje predstavljaju, prema tome, granične vrednosti za struje dvostrukih zemljospojeva.

2. NAPON NEUTRALNE TAČKE U NORMALNOM RADU

Napon neutralne tačke u normalnom radu jednak je nuli samo kod mreža koje su idealno simetrične tako da im faze imaju jednake električne parametre. Simetriju mreže najviše remete vazdušni vodovi, naročito ako su dugi i ako nije izvedeno preplitanje faznih provodnika. Simetrija transformatora i kablovskih vodova može se smatrati praktično potpunom.

Pošto se kod uobičajenih sprega transformatora nesimetrija opterećenja prenosi u distributivnu mrežu kao međufazna, to potrošači ne dovode do povišenja napona neutralne tačke, kako će se videti iz narednih razmatranja.

Na sl. 2.1 prikazana je šematski tipična distributivna mreža sa napojnim i prijemnim transformatorom uobičajenih sprega. Neutralna tačka napojnog transformatora uzemljena je preko admitanse $\underline{Y}_N$.

Sl. 2.1

Ako se zanemare redne impedanse elemenata, mreža sa sl. 2.1 može se prikazati preko ekvivalentne šeme na sl. 2.2.

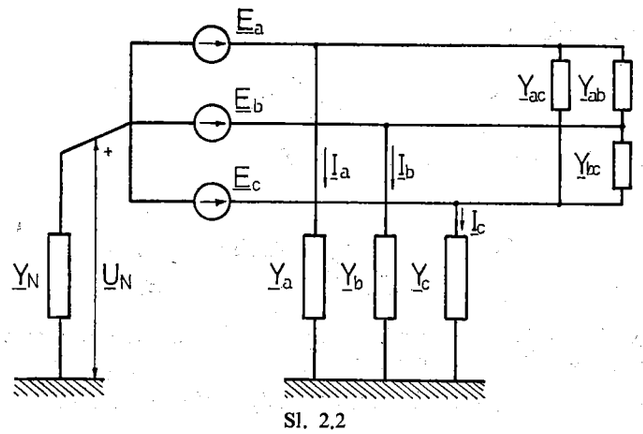
Na slici su sa $\underline{E}_a$, $\underline{E}_b$ i $\underline{E}_c$ označene e. m. s. napojne mreže. Parametri $\underline{Y}$ predstavljaju admitanse faza međusobno i prema zemlji. Admitanse između faza obuhvataju, pored odgovarajućih parametara vodova, i admitanse opterećenja, prevedene na stranu mreže.

Prema šemi na sl. 2.2 može se napisati

$$\begin{aligned}(\underline{E}_a+\underline{U}_N)\,\underline{Y}_a&=\underline{I}_a,\\(\underline{E}_b+\underline{U}_N)\,\underline{Y}_b&=\underline{I}_b,\\(\underline{E}_c+\underline{U}_N)\,\underline{Y}_c&=\underline{I}_c\end{aligned}\qquad(2.1)$$

i

$$\underline{U}_N\,\underline{Y}_N=-(\underline{I}_a+\underline{I}_b+\underline{I}_c).\qquad(2.2)$$



Sl. 2.2

Rešavanjem jednačina (2.1) i (2.2) po $\underline{U}_N$ dobija se

$$\underline{U}_N=-\frac{\sum\limits_k \underline{Y}_k\,\underline{E}_k}{\sum\limits_k \underline{Y}_k+\underline{Y}_N}\qquad k=a,\,b,\,c\qquad(2.3)$$

Izraz (2.3) pokazuje da, u okviru učinjenih uprošćenja, napon neutralne tačke ne zavisi od admitansi između faza. U stvarnim uslovima, kada se obuhvate padovi napona u rednim impedansama transformatora i vodova, pomenuta zavisnost ipak postoji, ali je bez većeg praktičnog značaja.

Relaciji (2.3) može se dati oblik

$$\underline{U}_N=\underline{K}_z\,\underline{U}_{iN}\qquad(2.4)$$

gde je

$$\underline{U}_{iN}=\frac{\sum\limits_k \underline{Y}_k\,\underline{E}_k}{\sum\limits_k \underline{Y}_k}\qquad k=a,\,b,\,c\qquad(2.5)$$

$$\underline{K}_z=\frac{\sum\limits_k \underline{Y}_k}{\sum\limits_k \underline{Y}_k+\underline{Y}_N}\qquad k=a,\,b,\,c.\qquad(2.6)$$

Veličina $\underline{U}_{iN}$ predstavlja, kako se jednostavno zaključuje, napon neutralne tačke posmatrane mreže kada bi ova radila izolovana. Zaista, $\underline{U}_{iN}$ se dobija iz izaraza za $\underline{U}_N$ kada se uvrsti $\underline{Y}_N=0$.

Sačinilac $\underline{K}_z$ obuhvata uticaj načina uzemljenja na napon neutralne tačke. Ako nultu admitansu vodova odredimo kao

$$\underline{Y}_0=\frac{1}{3}\sum_k \underline{Y}_k, \quad k=a, b, c, \tag{2.7}$$

za parametar $\underline{K}_z$ ima se

$$\underline{K}_z=\frac{3\,\underline{Y}_0}{3\,\underline{Y}_0+\underline{Y}_N}. \tag{2.8}$$

Relaciji (2.5) može se dati matrični oblik

$$\underline{U}_{iN}=-\frac{1}{\sum\limits_{k=a,b,c}\underline{Y}_k}\left\|\underline{Y}_a\,\underline{Y}_b\,\underline{Y}_c\right\|\left\|\begin{matrix}\underline{E}_a\\ \underline{E}_b\\ \underline{E}_c\end{matrix}\right\|. \tag{2.5'}$$

Napon $\underline{U}_{iN}$ korisno je izraziti preko α, β, 0 komponenti e. m. s. kako bi se uporedio uticaj pojedinih komponenti.

Saglasno (II. 15) i (II. 16), umesto (2.5') može se napisati

$$\underline{U}_{iN}=-\frac{1}{\sum\limits_{k=a,b,c}\underline{Y}_k}\left\|\underline{Y}_a\,\underline{Y}_b\,\underline{Y}_c\right\|\left\|\begin{matrix}1 & 0 & 1\\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1\\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1\end{matrix}\right\|\left\|\begin{matrix}\underline{E}_\alpha\\ \underline{E}_\beta\\ \underline{E}_0\end{matrix}\right\|. \tag{2.9}$$

Kada se matrice u (2.9) pomnože, dobija se, posle sređivanja,

$$\underline{U}_{iN}=-(\underline{K}_\alpha\,\underline{E}_\alpha+\underline{K}_\beta\,\underline{E}_\beta+\underline{E}_0), \tag{2.10}$$

gde je označeno

$$\underline{K}_\alpha=\frac{2\,\underline{Y}_a-\underline{Y}_b-\underline{Y}_c}{2\sum\limits_{k=a,b,c}\underline{Y}_k} \tag{2.11}$$

i

$$\underline{K}_\beta=\frac{\sqrt{3}\,(\underline{Y}_b-\underline{Y}_c)}{2\sum\limits_{k=a,b,c}\underline{Y}_k}. \tag{2.12}$$

Parametri $\underline{K}_\alpha$ i $\underline{K}_\beta$ mogu se nazvati sačiniocima simetrije mreže za α i β redosled. Kako se vidi iz (2.10), pomenuti sačinilac za nulti redosled jednak je 1 i znatno je veći od $\underline{K}_\alpha$ i $\underline{K}_\beta$.

Kod simetričnog sistema napajanja je

$$\underline{E}_b=\underline{E}_a e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$
$$\underline{E}_c=\underline{E}_a e^{j\frac{2\pi}{3}} \tag{2.13}$$

tako da će, saglasno (II. 12), biti

$$\underline{E}_\alpha=\underline{E}_a,$$
$$\underline{E}_\beta=-j\underline{E}_a, \tag{2.14}$$
$$\underline{E}_0=0.$$

Na osnovu (2.10) i (2.14) dobija se, u posmatranom slučaju,

$$\underline{U}_{iN}=-(K_\alpha-jK_\beta)\,\underline{E}_a, \tag{2.15}$$

iz čega sledi

$$U_{iN}=KE_a \tag{2.16}$$

gde je

$$K=\sqrt{K^2{}_\alpha+K^2{}_\beta}. \tag{2.17}$$

Vrednosti sačinilaca K_α, K_β i K za nekoliko rasporeda provodnika na stubu, kao i vrednosti kapaciteta provodnika prema zemlji, date su u Tabeli 2.1 [74]. Sačinioci su računati uz zanemarenje aktivnih odvodnosti tako da predstavljaju realne brojeve. Podaci se odnose na neprepletene vodove.

Kako se vidi, kod jednostrukih vodova sačinilac K ne prelazi vrednost 0,037. Napon u neutralnoj tački iznosi, prema tome, samo 3,7% pogonskog faznog napona, što ne bi smetalo normalnom radu izolovane mreže.

Napon U_{iN} može da dobije znatne vrednosti ako dođe do isključenja jedne od faza mreže na većoj dužini. Pretpostavimo da je mreža simetrična i da je isključen deo faze *b*. U navedenom slučaju biće, ako se obuhvati samo uticaj kapaciteta,

$$\underline{Y}_a=\underline{Y}_c\approx j\omega C_0 \tag{2.18}$$

$$\underline{Y}_b\approx j\omega mC_0, \tag{2.19}$$

gde je $m<1$.

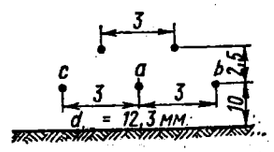
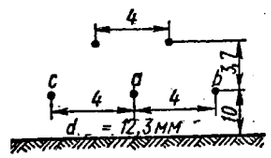
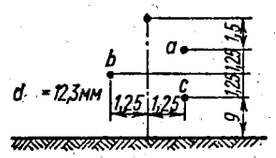
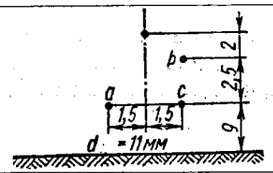
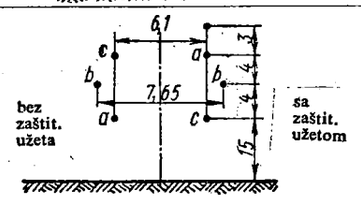
Ako se admitanse mreže sa vrednostima (2.18) i (2.19) uvrste u (2.11) i (2.12) odnosno (2.17), dobija se

$$K=\frac{1-m}{2+m}. \tag{2.20}$$

Izraz (2.20) pokazuje da bi u slučaju isključenja faze u celoj njenoj dužini, čemu odgovara $m=0$, napon U_{iN} dostigao polovinu vrednosti pogonskog faznog napona.

Stvarni napon neutralne tačke, U_N, jako je zavisan od sačinioca $\underline{K}_z$, odnosno načina uzemljenja. Kod mreža uzemljenih preko malih impedansi je $Y_N \gg 3\,Y_0$ i otuda $K_z\approx 0$, tako da se neutralna tačka, nezavisno od vrednosti napona U_{iN} odnosno postojeće konstruktivne asimetrije mreže, nalazi praktično na nultom potencijalu. Kod izolovanih mreža, za koje je $\underline{K}_z=1$, konstruktivna asimetrija može

TABELA 2.1

Skica rasporeda provodnika	Kapaciteti faza prema zemlji nF/m		Sačinioci simetrije	
	bez zaštitnog užeta	sa zaštitnim užetom	bez zaštitnog užeta	sa zaštitnim užetom
	$C_c = 4{,}8$ $C_a = 4{,}3$ $C_b = 4{,}8$	$C_c = 5{,}6$ $C_a = 5{,}2$ $C_b = 5{,}6$	$K_\alpha = +0{,}036$ $K_\beta = 0$ $K = 0{,}036$	$K = +0{,}024$ $K = 0.$ $K = 0{,}024$
	$C_c = 5{,}5$ $C_a = 4{,}9$ $C_b = 5{,}5$	$C_c = 6{,}3$ $C_a = 5{,}9$ $C_b = 6{,}3$	$K_\alpha = -0{,}037$ $K_\beta = 0$ $K = 0{,}037$	$K = -0{,}022$ $K = 0$ $K = 0{,}022$
	$C_a = 4{,}5$ $C_b = 4{,}65$ $C_c = 4{,}7$	$C_a = 5{,}7$ $C_b = 5{,}6$ $C_c = 5{,}5$	$K_\alpha = -0{,}012$ $K_\beta = -0{,}003$ $K = 0{,}013$	$K = +0{,}010$ $K = -0{,}005$ $K = 0{,}011$
	$C_a = 4{,}6$ $C_b = 4{,}2$ $C_c = 4{,}3$	$C_a = 5{,}45$ $C_b = 5{,}2$ $C_c = 5{,}1$	$K_\alpha = +0{,}026$ $K_\beta = -0{,}007$ $K = 0{,}027$	$K = +0{,}019$ $K = +0{,}005$ $K = 0{,}020$
	$C_c = 3{,}1$ $C_b = 3{,}0$ $C_a = 3{,}7$	$C_a = 4{,}6$ $C_b = 3{,}7$ $C_c = 4{,}1$	$K_\alpha = +0{,}066$ $K_\beta = -0{,}009$ $K = 0{,}067$	$K = -0{,}056$ $K = -0{,}028$ $K = 0{,}063$

* Sa d je označen prečnik provodnika

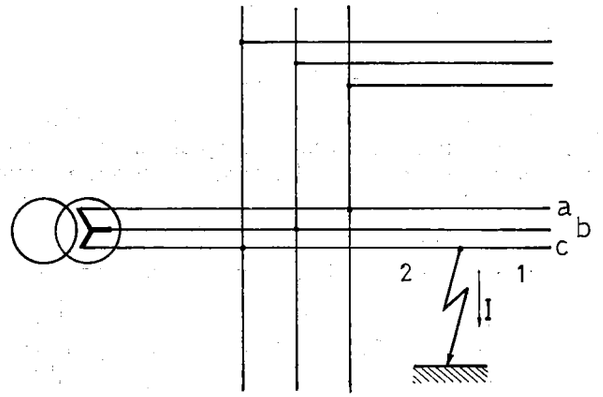
da prouzrokuje dodatno povišenje napona ispravnih faza pri pogonu sa zemljospojem, o čemu treba voditi računa pri izboru odvodnika prenapona. S obzirom na red vrednosti ovih povišenja, u ovom pogledu po pravilu ne treba očekivati nikakve teškoće.

Koeficijenat $\underline{K}_z$ kod kompenzovanih mreža može da ima znatne vrednosti, sa nepovoljnim posledicama za rad mreže (Tačka 4.1.2).

3. MREŽA SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM

3.1. STACIONARNE VREDNOSTI NAPONA I STRUJA PRI JEDNOFAZNOM ZEMLJOSPOJU

Pretpostavimo da je na jednom od vodova radijalne distributivne mreže, došlo do zemljospoja faze »*a*« (sl. 3.1). Učinićemo pretpostavku da je nastali kvar stabilan, sa zanemarljivo malim prelaznim otporom na mestu kontakta sa zemljom odnosno uzemljenim delovima i analizirati prilike u slučaju trajnog rada mreže sa zemljospojem.



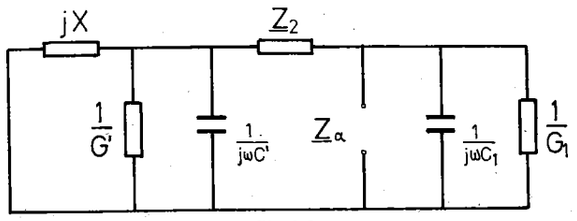
Sl. 3.1

Kompleksna amplituda struje zemljospoja može se odrediti prema opštoj formuli (1.72), kada se u pomenutu formulu uvrste odgovarajuće impedanse mreže.

Impedansa $\underline{Z}_\alpha$ za posmatrano mesto kvara može se odrediti iz ekvivalentne šeme za α redosled, prikazane na slici 3.2.

Na slici smo sa jX označili reaktansu transformatora i napojne mreže, C_1 i G_1 su kapacitet i aktivna odvodnost voda u kvaru na deonici od mesta kvara do kraja sa potrošačima, a C' i G' ukupni kapaciteti i odvodnosti celog ostalog dela mreže. Odvodnosti obuhvataju i uticaj potrošača. Sa $\underline{Z}_2$ je označena impedansa voda u kvaru do napojnog transformatora.

Iz šeme su jednostavnosti radi izostavljeni parametri $\underline{Z}$ ostalih vodova pošto ovi stoje u rednoj vezi sa G, C granama vodova koje imaju vrlo velike impedanse. Iz istog je razloga izostavljena i impedansa $\underline{Z}_1$ deonice voda u kvaru od mesta kvara do kraja sa potrošačima.



Sl. 3.2

Ako se ima u vidu da je uvek

$$X \ll \frac{1}{|G' + j\omega C'|}$$

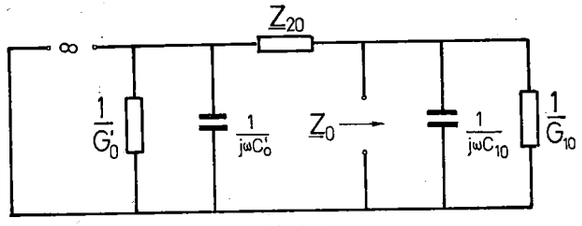
i

$$|jX + \underline{Z}_2| \ll \frac{1}{|G_1 + j\omega C_1|},$$

iz šeme na sl. 2 se dobija

$$\underline{Z}_\alpha = jX + \underline{Z}_2. \tag{3.1}$$

Ekvivalentna šema mreže za nulti redosled prikazana je na sl. 3.3. Parametri imaju isto značenje kao u prethodnoj šemi. Pošto je neutralna tačka napojnog transformatora neuzemljena, ovaj suprotstavlja beskonačno veliku impedansu nultim strujama.



Sl. 3.3

Kako je uvek

$$Z_{20} \ll \frac{1}{|G'_0 + j\omega C'_0|},$$

može se napisati

$$\underline{Z}_0 \approx \frac{1}{G_0 + j\omega C_0}, \tag{3.2}$$

gde G_0 i C_0 predstavljaju ukupnu odvodnost i kapacitet mreže

$$G_0 = G_0' + G_{10}, \qquad C_0 = C_0' + C_{10}. \tag{3.3}$$

Po pravilu je

$$\frac{\underline{Z}_\alpha}{\underline{Z}_0} = |G_0 + j\omega C_0|\,|Z_2 + jX| \ll 1. \tag{3.4}$$

Na osnovu (3.2) i (3.4) iz (1.72) se dobija

$$\underline{I}_z = \underline{I}_G + j\,\underline{I}_C, \tag{3.5}$$

gde smo označili

$$\underline{I}_G = 3\,G_0\,\underline{U}_{ra}, \tag{3.6}$$

$$\underline{I}_C = j\,3\,\omega C_0\,\underline{U}_{ra}. \tag{3.7}$$

Aktivna komponenta struje zemljospoja obično nije veća od $4 \div 8\%$ kapacitivne komponente.

Ako se pretpostavi da je U_{ra} jednak nazivnom faznom naponu mreže, struja I_c izračunava se iz formule

$$I_c = 3\,\omega\,C_0\,U_n, \tag{3.8}$$

gde je sa U_n označen nazivni (međufazni) napon.

Kod homogenih mreža može se pisati

$$I_c = 3\,\omega\,c_0\,U_n\,\Sigma\,l, \tag{3.9}$$

pri čemu $\Sigma\,l$ označava ukupnu dužinu vodova mreže.

Ako se za kablovske vodove usvoji u proseku $\omega\,c_0 = 80 \cdot 10^{-6}$ S/km, a za vazdušne vodove $\omega\,c_0 \approx 1{,}6 \cdot 10^{-6}$ S/km, iz (3.9) se dobija za kablovske mreže

$$I_c = \frac{1}{7}\,\frac{U_n}{\text{kV}}\,\frac{\Sigma\,l}{\text{km}}\,A, \tag{3.10}$$

a za vazdušne

$$I_c = \frac{1}{350}\,\frac{U_n}{\text{kV}}\,\frac{\Sigma\,l}{\text{km}}\,A. \tag{3.11}$$

Relacije (3.10) i (3.11) mogu poslužiti za orijentacione praktične proračune. Usvojena vrednost $\omega\,c_0$ kod kablova odgovara papirnoj izolaciji.

Prema (1.25) i (1.27) kompleksne amplitude komponenti $\underline{U}_b''$ i $\underline{U}_c''$ napona ispravnih faza na mestu kvara jednake su

$$\underline{U}_b'' = \underline{U}_c'' = \frac{\frac{\underline{Z}_\alpha}{\underline{Z}_0} - 1}{2\,\frac{\underline{Z}_\alpha}{\underline{Z}_0} + 1}\,\underline{U}_{ra}. \tag{3.12}$$

Na osnovu (3.4) iz (3.12) se dobija

$$\underline{U}''_b = \underline{U}''_c = -\underline{U}_{ra}. \tag{3.13}$$

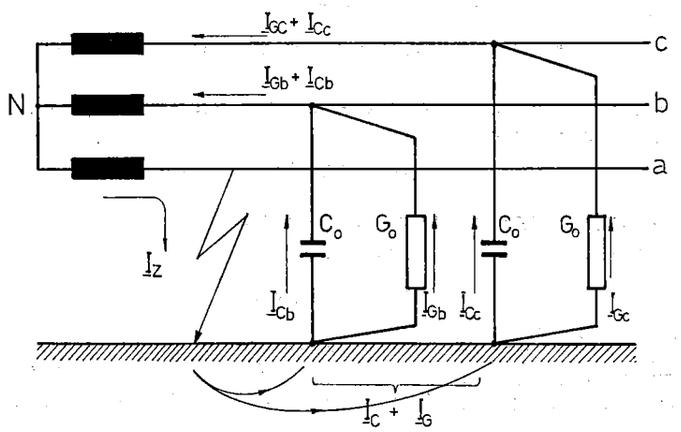
Naponi ispravnih faza na mestu kvara jednaki su, kada se primeni superpozicija na režim bez zemljospoja,

$$\underline{U}_b = \underline{U}_{rb} - \underline{U}_{ra}, \tag{3.14}$$

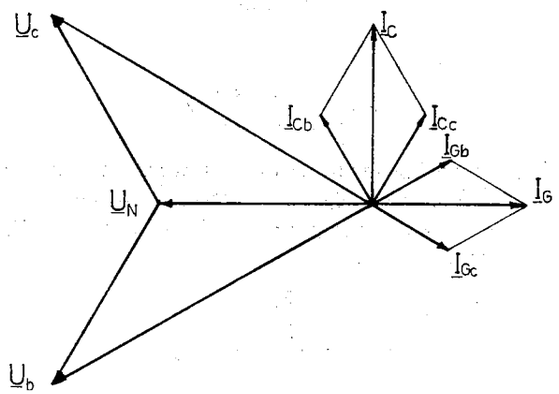
$$\underline{U}_c = \underline{U}_{rc} - \underline{U}_{ra}. \tag{3.15}$$

Iz (3.13) i (3.14) se vidi da ispravne faze dolaze u odnosu na zemlju na složeni, međufazni napon, tj. dobijaju $\sqrt{3}$ puta veće vrednosti u odnosu na režim pre nastanka kvara. Iste vrednosti dobijaju se i iz opštih dijagrama na sl. 1.14 i sl. 1.15 za velike vrednosti Z_0/Z_α, koje su karakteristične za izolovane mreže.

Da bi se dobila jasnija fizička slika o prilikama pri zemljospoju tokovi struja prikazani su na trofaznoj šemi na sl. 3.4. Na sl. 3.5 dat je dijagram kompleksnih amplituda napona i struja.



Sl. 3.4



Sl. 3.5

Kako se vidi, neutralna tačka pri zemljospoju dolazi na napon $-\underline{U}_{ra}$, a faze nepogođene kvarom na međufazne napone, u skladu sa (3.12) i (3.13). Struje kroz odvodnost G_0 pomerene su za 180° prema odgovarajućim naponima faza, saglasno smerovima usvojenim na sl. 3.4. Struje $\underline{I}_{cb}$ i $\underline{I}_{cc}$ kasne 90° za pomenutim naponima.

Kako je

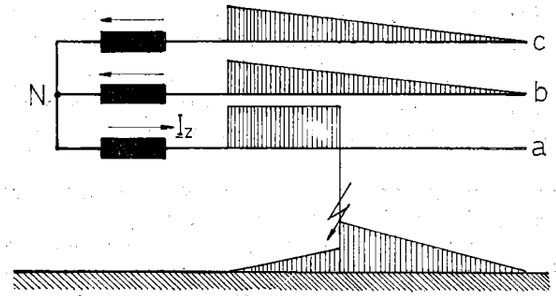
$$I_{cb} = I_{cc} = \omega\, c_0 \sqrt{3}\, U_{nf},$$

za I_c se prema dijagramu na sl. 3.5 dobija

$$I_c = 2\, I_{cb} \cos 30° = 3\, \omega\, c_0\, U_{nf}.$$

Struja I_c, kako se vidi sa sl. 3.5, prednjači fazno naponu U_{ra} za 90°. Dobijeni rezultat je, prema tome, u skladu sa izrazom (3.7), izvedenim pomoću α, β, 0 komponenti. Na sličan način mogla bi se izvesti i relacija (3.6).

Sl. 3.4 pokazuje da struje ispravnih faza teku prema neutralnoj tački napojnog transformatora. One ovde prelaze na fazu pogođenu kvarom i, idući po njoj, prolaze kroz mesto kvara, gradeći struju zemljospoja. Ista situacija ima se i u slučaju mreže sastavljene od više vodova. Struje odvodnosti ispravnih faza svih vodova mreže teku ka neutralnoj tački napojnog transformatora gde se superponiraju i, preko neispravne faze voda u kvaru, prolaze do mesta zemljospoja i ovde se odvode u tle.



Sl. 3.6

Vodovi mreže su elementi sa raspoređenim parametrima. Struje ispravnih faza zato postepeno rastu od krajeva vodova do napojnih sabirnica, gde dobijaju prethodno izračunate vrednosti. Stvarna raspodela struja za razmatrani slučaj kvara, uz uvažavanje raspodeljenosti odvodnosti faza, prikazana je na sl. 3.6. Na slici je pokazana raspodela struja u fazama i tlu.

3.2. SAMOGAŠENJE JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA

Jedno od osnovnih pozitivnih svojstava rešenja sa izolovanom neutralnom tačkom leži u tome što se jednofazni zemljospojevi, zbog malih struja, ne moraju da isključuju automatski, nego posle isteka određenog vremena potrebnog za nalaženje mesta kvara i njegovo izdvajanje. Ovim se omogućava samogašenje prolaznih

zemljospojeva kakvih je znatan broj, naročito kod vazdušnih mreža koje su izložene atmosferskim pražnjenjima. Kako su pokazala višegodišnja merenja u nizu mreža 10 kV i 20 kV [18, 27], udeo prolaznih zemljospojeva u ukupnom broju kvarova može da bude primetan i kod kablovskih mreža (8. Poglavlje).

Uslovi za samogašenje zemljospojeva vrlo su složeni jer zavise od više činilaca. Najvažniji od njih su mesto i uzrok kvara, brzina uspostavljanja i amplituda povratnog napona i vrednost struje zemljospoja.

3.2.1. MESTO I UZROK KVARA

Kod prolaznih jednofaznih zemljospojeva treba razlikovati u osnovi dve vrste: zemljospojeve koji nastaju usled prolaznih uzroka i posle njihovog delovanja ostavljaju neoštećenu izolaciju na mestu kvara i — zemljospojeve koji su posledica delimičnog narušavanja izolacije mreže ili, nezavisno od uzroka kvara, posle gašenja ostavljaju na mestu kvara oslabljenu izolaciju.

U prvu grupu kvarova spadaju mnogi zemljospojevi usled atmosferskih pražnjenja, ptica i drugih životinja, grana drveća, kao i zemljospojevi prouzrokovani preskokom preko izolatora usled komutacionih ili drugih unutarnjih prenapona u mreži. Ovakvih kvarova ima dosta u vazdušnim mrežama ali mogu nastati i u postrojenjima, kako vazdušnih, tako i kablovskih mreža. Ovde obično dolazi do preskoka na sabirnicama, strujnim transformatorima, uvodnim izolatorima energetskih transformatora, raznim potpornim i provodnim izolatorima i dr. Povećan broj kvarova ovakve vrste ima se ako je izolacioni nivo mreže snižen usled vlage ili zaprljanosti, što je čest slučaj u gradskim i industrijskim oblastima.

Navedeni kvarovi, ako ne dovedu usled termičkog delovanja do trajnijeg kvara izolacije ili oštećenja elemenata postrojenja, ne ostavljaju posledice i ne moraju se registrovati ni tražiti. Samogašenje opisanih zemljospojeva je poželjno u svakom pogledu.

U drugu grupu zemljospojeva, »lažno prolaznog« karaktera, treba svrstati i kvarove u uljnoj izolaciji i kablovskoj masi usled prodiranja vlage i zaostalih metalnih delova ili zaprljanosti, fabričkih grešaka i nekvalitetne montaže. Do gašenja zemljospoja kod razmatranih oštećenja dolazi pod delovanjem ulja, na isti način kao kod uljnih prekidača. Posle prekida struje zemljospoja izolacija na mestu kvara zaliva se uljem ili drugom izolacionom masom tako da se može dovoljno povratiti da podnosi normalni radni napon mreže. Ovakvi kvarovi obično se dešavaju u kablovskim završnicama i spojnicama. U lažno prolazne zemljospojeve treba svrstati i sve kvarove usled prolaznih uzroka koji su prouzrokovali izvesno oštećenje izolacije na mestu kvara. Lažno prolazni zemljospojevi, znači, iako se gase i trenutno ne ometaju rad mreže, stvaraju slabe tačke koje predstavljaju latentne izvore novih zemljospojeva i, što je naročito neugodno, i dvostrukih pa i višestrukih kvarova koji su nepoželjni, kako zbog naprezanja opreme, tako i ugrožavanja bezbednosti ljudi.

Samogašenje lažno-prolaznih zemljospojeva obezbeđuje privremeno normalan pogon električne mreže. Da bi se, međutim, održao potreban izolacioni nivo mreže trebalo bi povremeno, posebno kablovske mreže, podvrgnuti profilaktičkim naponskim ispitivanjima radi otkrivanja mesta sa sniženom izolacijom. Ovakva ispitivanja mogu se izvoditi u vreme kada će to najmanje ometati potrošače. Samogašenje lažno-prolaznih zemljospojeva koje omogućava izolovana neutralna tačka, odlaže,

prema tome, isključenje i opravke zemljospojeva u vreme podesnije za potrošače, što se može smatrati poželjnim.

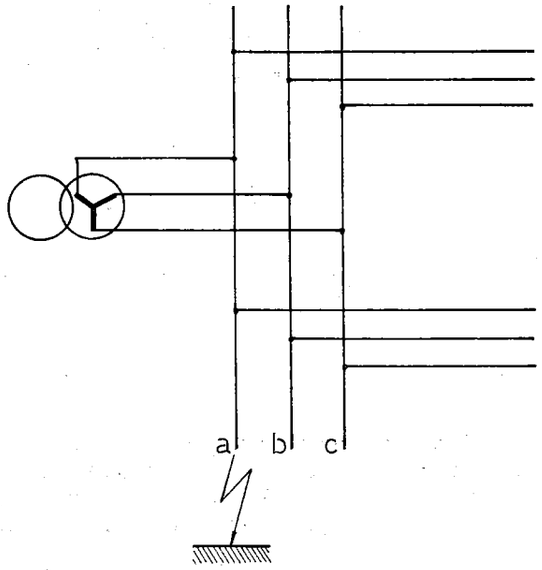
Profilaktička ispitivanja izolacije mogu da kod mreža većeg obima budu zametna i složena. Kod dosta opterećenih mreža ovakva je merenja teško ako ne i praktično nemoguće sprovoditi dovoljno sistematski. Ovo može da dovede do postepenog zapuštanja mreža i, vremenom, osetnog povećanja broja jednofaznih zemljospojeva i složenijih kvarova.

3.2.2. POVRATNI NAPON

Pretpostavimo da je do zemljospoja došlo na sabirnicama napojnog transformatora sa kojih polazi veći broj vodova distributivne mreže približno jednakih karakteristika i dužina. U kvaru je faza »*a*« i zemljospoj je stabilan i bez luka (sl. 3.7).

Za proračun povratnog napona kod gašenja zemljospoja potrebno je, kako je pokazano u 1.1.4, odrediti impedanse mreže za α i 0 redosled na mestu kvara.

Približna ekvivalentna šema mreže za α redosled prikazana je na sl. 3.8. U njoj su sa r i L označeni parametri napojne mreže i transformatora. Parametri G i C predstavljaju ukupni pogonski kapacitet i aktivnu odvodnost vodova mreže vezanih paralelno, a r_1 i L_1 njihovu ekvivalentnu rednu otpornost i induktivnost. U šemi su parametri G i C koncentrisani u jednom čvoru, a ne raspodeljeni duž voda. Učinjeno uprošćenje je bez značaja za razmatrane analize budući da na uslove samogašenja bitni uticaj imaju pojave pri nižim učestanostima.



Sl. 3.7

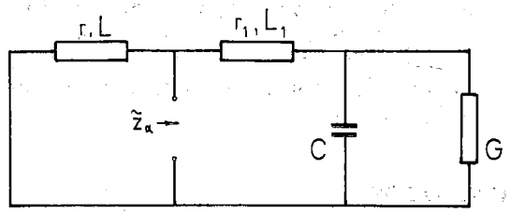
Iz šeme sa sl. 3.8 se izračunava

$$\hat{z}_\alpha = L_e \frac{\left(s+\frac{r}{L}\right)\left[s^2+\left(\frac{r_1}{L_1}+\frac{G}{C}\right)s+\frac{1}{L_1 C}+\frac{Gr_1}{CL_1}\right]}{s^2+\left(\frac{r+r_1}{L+L_1}+\frac{G}{C}\right)s+\frac{1}{(L+L_1)C}+G\frac{r+r_1}{L+L_1}}, \tag{3.16}$$

gde smo označili

$$L_e = \frac{L_1 L}{L_1+L}. \tag{3.17}$$

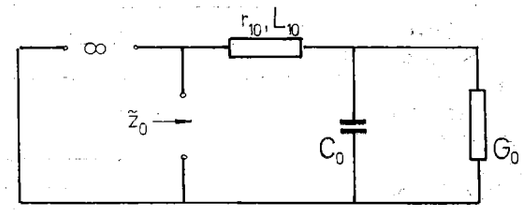
Na sl. 3.9 prikazana je ekvivalentna šema mreže za 0 redosled sa istim značenjem simbola kao na sl. 3.8.



Sl. 3.8

Iz šeme se dobija

$$\tilde{z}_0 = L_{10}\frac{s+\left(\frac{r_{10}}{L_{10}}+\frac{G_0}{C_0}\right)s+\frac{1}{L_{10}C_0}+\frac{G_0 r_{10}}{L_{10}C_0}}{s+\frac{G_0}{C_0}}. \tag{3.18}$$



Sl. 3.9

Pošto je, prema pretpostavci, u pitanju stabilni zemljospoj bez električnog luka na mestu kvara, struja zemljospoja moći će se eventualno ugasiti pri svom prolasku kroz nultu vrednost. Ako ovaj trenutak usvojimo kao početni za proučavanje procesa, struja zemljospoja u našim razmatranjima menjaće se po zakonu

$$i_z = \sqrt{2}\, I_z \sin \omega t. \tag{3.19}$$

U (3.19) je, saglasno (3.5) do (3.7),

$$I_z = 3\, U_{ra}\sqrt{G_0^2+(\omega C_0)^2}. \tag{3.20}$$

S obzirom na (3.19), ima se (Tabela I. 2)

$$\tilde{I}_z = \frac{\sqrt{2}\, I_z\, \omega}{s^2+\omega^2}. \tag{3.21}$$

Komponenta povratnog napona uslovljena procesima u šemi α redosleda jednaka je, u skladu sa (1.97)

$$\tilde{u}_\alpha'' = \mathscr{L}^{-1}\left\{\frac{2}{3}\,\tilde{z}_\alpha\,\tilde{i}_z\right\}. \tag{3.22}$$

Impedansu $\tilde{z}_\alpha$ možemo prikazati na sledeći način:

$$\tilde{z}_\alpha = \frac{L_e\left(s+\frac{r}{L}\right)\cdot A_\alpha(s)}{s^2+2\,\delta_\alpha s+\delta_\alpha{}^2+\omega_\alpha{}^2} \tag{3.23}$$

gde je

$$A_\alpha(s) = s^2+\left(\frac{r_1}{L_1}+\frac{G}{C}\right)s+\frac{1}{L_1 C}+\frac{G}{C}\,\frac{r_1}{L_1}, \tag{3.24}$$

$$\delta_\alpha = \frac{1}{2}\left(\frac{r+r_1}{L+L_1}-\frac{G}{C}\right), \tag{3.25}$$

$$\omega_\alpha = \sqrt{\omega_{i\alpha}^2-\frac{1}{4}\left(\frac{r+r_1}{L+L_1}-\frac{G}{C}\right)^2}. \tag{3.26}$$

U (3.26) je sa $\omega_{i\alpha}$ označena sopstvena kružna učestanost šeme za α redosled kada se ne bi uvažavali gubici

$$\omega_{i\alpha} = \frac{1}{\sqrt{(L+L_1)\,C}}. \tag{3.27}$$

Iz (3.21) do (3.23) sledi da je $\tilde{u}_\alpha''$ racionalna funkcija od s i da polinom u imeniocu ima dva para kompleksnih korena: $a_{1,2} = \pm j\omega$ i $a_{3,4} = -\delta_\alpha \pm j\omega_\alpha$, koji predstavljaju jedine korene pomenutog polinoma.

Napon $\tilde{u}_\alpha''$ može se prema tome, izračunati primenom formule

$$u_\alpha'' = \frac{2}{3}\sqrt{2}\, I_z\, \omega\left[\mathrm{Re}\left\{\frac{L_e\left(j\omega+\frac{r}{L}\right)A_\alpha(j\omega)}{j\omega\left(-\omega^2+j\,2\,\delta_\alpha\omega+\delta_\alpha{}^2+\omega_\alpha{}^2\right)}\,e^{j\omega t}\right\}+\right.$$

$$\left.+\,\mathrm{Re}\left\{\frac{L_e}{j\omega_\alpha}\,\frac{\left(-\delta_\alpha+j\omega_\alpha+\frac{r}{L}\right)A_\alpha(-\delta_\alpha+j\omega_\alpha)}{(-\delta_\alpha+j\omega_\alpha)^2+\omega^2}\,e^{j\omega_\alpha t}\right\}e^{-\delta_\alpha t}\right]. \tag{3.28}$$

Ako se u (3.28) zanemare svi mali parametri koji sadrže aktivne otpornosti i odvodnosti šeme, osim koeficijenta prigušenja u eksponentu, imaće se

$$A_\alpha(j\omega) \approx \omega_{1\alpha}^2-\omega^2, \tag{3.29}$$

$$A_\alpha(-\delta_\alpha+j\omega_\alpha) \approx \omega_{1\alpha}^2-\omega_{i\alpha}^2, \tag{3.30}$$

$$\omega_{i\alpha} \approx \omega_\alpha, \tag{3.31}$$

gde smo označili

$$\omega_{1\alpha} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}. \tag{3.32}$$

Kada se pored učinjenih uprošćenja u formulu (3.28) uvrsti i, saglasno (3.7),

$$I_z \approx I_c = 3\,\omega c_0\, U_{nf}, \tag{3.33}$$

dobija se

$$u_\alpha'' \approx 2\sqrt{2}\, U_{nf}\left(\frac{\omega}{\omega_{e0}}\right)^2 \frac{\omega_{1\alpha}^2-\omega^2}{\omega_\alpha^2-\omega^2}\left(\cos\omega t-\frac{\omega_{1\alpha}^2-\omega_\alpha^2}{\omega_{1\alpha}^2-\omega^2}\, e^{-\delta_\alpha t}\cos\omega_\alpha t\right). \quad (3.34)$$

U (3.34) smo označili

$$\omega_{e0}=\frac{1}{\sqrt{L_e C_0}}. \quad (3.35)$$

Kako je obično $L \gg L_1$, može se pisati

$$\omega_{e0}\approx\omega_{1\alpha}. \quad (3.36)$$

Ako se ima u vidu (3.36), kao i da je

$$\omega_{1\alpha}^2 \gg \omega^2, \quad \omega_\alpha^2 \gg \omega^2,$$

izraz (3.34) postaje

$$u_\alpha'' \approx 2\sqrt{2}\left(\frac{\omega}{\omega_\alpha}\right)^2 U_{nf}\left(\cos\omega t-\frac{\omega_{1\alpha}^2-\omega_\alpha^2}{\omega_{1\alpha}^2}\, e^{-\delta_\alpha t}\cos\omega_\alpha t\right). \quad (3.37)$$

Pošto je kružna učestanost ω_α po pravilu bar desetak puta veća od ω, napon u_α'' ima obično neznatne vrednosti u poređenju sa nominalnim faznim naponom mreže.

Komponenta povratnog napona uslovljena procesima u šemi mreže za nulti redosled izračunava se, u skladu sa (1.97), kao

$$u_0'' = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{3}\,\tilde{z}_0\,\tilde{I}_z\right\}. \quad (3.38)$$

Napišimo (3.18) u obliku

$$\tilde{z}_0 = L_{10}\frac{A_0(s)}{s+\dfrac{G_0}{C_0}}. \quad (3.39)$$

Napon u_0'' jednak je tada, saglasno (3.38), (3.21) i (I. 33),

$$u_0'' = \frac{\sqrt{2}}{3} I_z \omega\left[\mathrm{Re}\left\{\frac{L_{10}A_0(j\omega)}{j\omega\left(j\omega+\dfrac{G_0}{C_0}\right)}\, e^{j\omega t}\right\}+\frac{L_{10}A_0\left(-\dfrac{G_0}{C_0}\right)}{\left(\dfrac{G_0}{C_0}\right)^2+\omega^2}\, e^{-\frac{G_0}{C_0}t}\right]. \quad (3.40)$$

Ako se u (3.40) zameni

$$A_0(j\omega)\approx\omega_{10}^2-\omega^2, \quad (3.41)$$

$$A_0\left(-\frac{G_0}{C_0}\right)\approx\omega_{10}^2, \quad (3.42)$$

gde je

$$\omega_{10}=\frac{1}{\sqrt{L_{10}C_0}}, \quad (3.43)$$

iz pomenutog izraza se, posle sređivanja, dobija

$$u_0'' = \sqrt{2}\, U_{nf}\left[\frac{\omega_{10}^2-\omega^2}{\omega_{10}^2}\sin(\omega t-\varphi_0)+\sin\varphi_0\, e^{-\frac{G_0}{C_0}t}\right] \quad (3.44)$$

pri čemu smo označili

$$\varphi_0 = \mathrm{arc\ tg}\,\frac{\omega C_0}{G_0}. \quad (3.45)$$

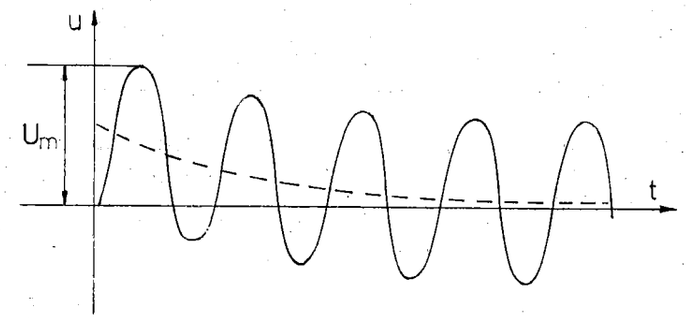
S obzirom da je $\omega_{10}^2 \gg \omega^2$, može se napisati

$$u_0'' = \sqrt{2}\, U_{nf}\left[\sin(\omega t-\varphi_0)+\sin\varphi_0\, e^{-\frac{G_0}{C_0}t}\right]. \quad (3.46)$$

Kako relacija (3.46) pokazuje, komponenta u_0'' znatno je veća od u_α'' tako da se povratni napon praktično poklapa sa naponom u_0''

$$u = u_\alpha'' + u_0'' \approx u_0''. \quad (3.47)$$

Tok povratnog napona prema (3.47) odnosno (3.46) pokazan je na sl. 3.10.



Sl. 3.10

Povratni napon se, kako se vidi, uspostavlja dosta brzo, sa kružnom učestanošću ω i pri tom može da ima vrednosti znatno veće od amplitude nazivnog faznog napona, naročito u prvoj poluperiodi posle gašenja struje, kada jednosmerna komponenta još nije prigušena.

Približno se može uzeti da će svoju najveću vrednost povratni napon postići u trenutku kada naizmenična komponenta u izrazu (3.46) prolazi kroz svoj prvi maksimum posle gašenja zemljospoja.

Vreme koje protekne od momenta gašenja do razmatranog trenutka određeno je relacijom

$$\omega t_1 - \varphi_0 = \frac{\pi}{2},$$

iz koje sledi

$$t_1 = \frac{1}{\omega}\left(\frac{\pi}{2}+\varphi_0\right). \quad (3.48)$$

Maksimalna vrednost povratnog napona dobija se kada se (3.48) uvrsti u (3.46)

$$U_m = \sqrt{2}\, U_{nf}\left(1 + \sin\varphi_0\, e^{-\frac{G_0}{C_0} t_1}\right). \tag{3.49}$$

Neka je, na primer, $G_0/\omega C_0 = 0{,}06$. Prema (3.45) je tada

$$\varphi_0 = \operatorname{arc\,tg} \frac{1}{0{,}06} = 86{,}56°.$$

Iz (3.48) se izračunava

$$t_1 = \frac{1}{360° \cdot 50}\left(\frac{180°}{2} + 86{,}56°\right) = 0{,}0098\ \text{s}$$

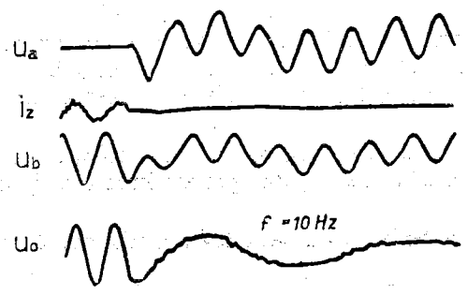
Saglasno (3.49) maksimalna vrednost povratnog napona iznosiće

$$U_m = (1 + 0{,}998\, e^{-0{,}06 \cdot 314 \cdot 0{,}0098})\sqrt{2}\, U_{nf} = 1{,}83\sqrt{2} \cdot U_{nf}.$$

Iz urađenog primera se vidi da maksimalna vrednost povratnog napona kod izolovane mreže može da bude i do skoro dva puta veća od amplitude nominalnog faznog napona. Ovo otežava uslove samogašenja i može da dovede do ponovnog uspostavljanja zemljospoja, što je obično praćeno pojavom znatnih prenapona (odeljak 3.4).

Naizmenični član u (3.46) poklapa se po vremenskom toku sa nultom komponentom napona na mestu kvara u režimu sa zemljospojem, ali je suprotnog polariteta, budući da je strujni izvor na sl. 1.17 usmeren od zemlje ka provodniku. Nulta komponenta napona na mestu kvara posle gašenja zemljospoja dobija se superpozicijom napona u režimu sa zemljospojem i napona u_0'' (odeljak 1.2)

$$u_0 = u_0' + u_0'' = u_0' - u_0' + \sqrt{2}\, U_{nf} \sin\varphi_0\, e^{-\frac{G_0}{C_0} t} = \sqrt{2}\, U_{nf} \sin\varphi_0\, e^{-\frac{G_0}{C_0} t}. \tag{3.50}$$



Sl. 3.11

Relacija (3.50) opisuje i tok napona u neutralnoj tački napojnog transformatora.

Na sl. 3.11 prikazan je oscilogram napona i struja pri gašenju zemljospoja snimljen u jednoj mreži sa izolovanom neutralnom tačkom [16]. Oscilogrami pokazuju tokove napona faze u kvaru, tj. povratnog napona, struje zemljospoja, napona jedne ispravne faze i napona neutralne tačke napojnog transformatora. Pošto je do gašenja zemljospoja došlo pri prelazu struje od pozitivnih ka negativnim vrednostima, povratni napon ima obrnuti polaritet nego na dijagramu na sl. 3.10.

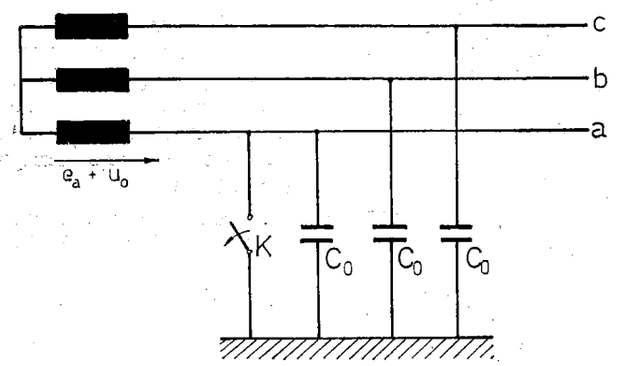
Sa oscilograma se vidi da karakteristični naponi, umesto jednosmerne, imaju blago promenljivu komponentu. Ona je prouzrokovana uticajem mernih naponskih

transformatora koji obrazuju oscilatorno kolo sa nultim kapacitetima. Učestanost pomenute komponente je svega reda 10 Hz zbog vrlo velikih induktivnosti naponskih transformatora.

Povratni napon dostiže u prvoj poluperiodi posle gašenja zemljospoja vrednost reda $1{,}8\sqrt{2}\, U_{nf}$.

3.2.3. UPROŠĆENA FIZIČKA SLIKA POJAVA POSLE GAŠENJA STRUJE ZEMLJOSPOJA

Posle gašenja električnog luka faza koja je bila u kvaru gubi kontakt sa zemljom, što se na šemi na sl. 3.12 može simbolički predstaviti otvaranjem kontakta *K*.



Sl. 3.12

Otvaranjem kontakta kapacitet pomenute faze vezuje se paralelno kapacitetima ispravnih faza. Usled ovoga dolazi do preraspodele električnog opterećenja, koja se odvija sve do trenutka kada se opterećenja svih faza ne izjednače. Napon na kapacitetima u uspostavljenom stacionarnom stanju, označimo ga sa u_0, određuje se iz uslova invarijantnosti ukupnog električnog opterećenja za stanje pre i posle gašenja luka

$$3\, C_0\, u_0 = C_0\, u_b\,(0_) + C_0\, u_c\,(0_). \tag{3.51}$$

U (3.51) su sa $u_b\,(0_)$ i $u_c\,(0_)$ označene vrednosti napona ispravnih faza neposredno pre gašenja zemljospoja.

Za

$$u_b\,(0_) = u_c\,(0_) \tag{3.52}$$

iz (3.51) se dobija

$$u_0 = \frac{2}{3}\, u_b\,(0_). \tag{3.53}$$

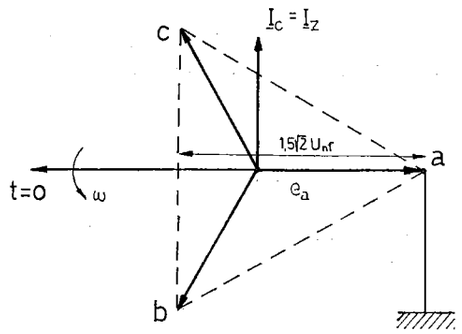
Napon u_0 je jednosmeran i u realnim uslovima prigušio bi se posle određenog vremena budući da se kapaciteti C_0 prazne preko aktivnih odvodnosti faza prema zemlji. Naponom u_0 određen je potencijal neutralne tačke.

Napon u_a, koji predstavlja povratni napon, jednak je, saglasno sl. 3.12,

$$u_a = e_a + u_0. \tag{3.54}$$

Izraz (3.54) je približan pošto se napon u_0 uspostavlja, ne trenutno, nego preko oscilatornog procesa uslovljenog induktivnostima napojnog transformatora. Amplitude pomenutih oscilacija su neznatne i bez praktičnog značaja, što je pokazano u 3.2.2.

Ako je do gašenja zemljospoja došlo u trenutku kada je struja zemljospoja imala nultu vrednost, biće, kako se vidi iz fazorskog dijagrama na sl. 3.13.



Sl. 3.13

$$u_b(0_-) = u_c(0_-) = 1{,}5\sqrt{2}\,U_{nf} \tag{3.55}$$

Trenutne vrednosti napona i struja dobijaju se, kako je poznato, projekcijom njihovih fazora na obrtnu vremensku osu. U trenutku $t=0$, ova je osa normalna na $\underline{I}_z$, ako se pretpostavi da je struja zemljospoja čisto kapacitivna.

Kada se ima u vidu (3.53) do (3.55), kao i sl. 3.13, dobija se

$$u_a = e_a + \sqrt{2}\,U_{nf} = \sqrt{2}\,U_{nf}(-\cos\omega t + 1) \tag{3.56}$$

Izvedena približna relacija u skladu je sa (3.47) odnosno (3.46) pošto bi se dobila iz (3.46) za $G_0=0$.

3.2.4. GRANIČNE STRUJE SAMOGAŠENJA

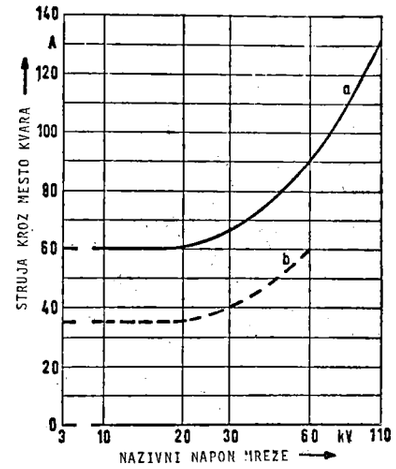
Da li će u određenoj situaciji doći do gašenja zemljospoja zavisi, kako smo već rekli, od više uslova. Neki od tih, kao na primer brzina i pravac vetra, vlažnost vazduha i atmosferski uticaji, nepredvidivi su i stohastičke su prirode. Uslovi za gašenje struje jako zavise od toga da li je do kvara došlo preskokom u vazduhu na nekoj izolacionoj konstrukciji ili probojem izolacije. Na pomenute uslove utiče i vrsta električne opreme primenjene u mreži, kao i pojedinosti različitih tehničkih rešenja.

Zbog složenosti opisanih okolnosti dosta je teško proceniti granične vrednosti struja zemljospoja pri kojima je još verovatno samogašenje zemljospojeva, koje će važiti u svim uslovima. Zato i danas postoje izvesna neslaganja u tehničkoj literaturi po ovom pitanju.

Ipak se došlo do zaključka da verovatnoću samogašenja zemljospoja prevashodno određuje vrednost struje zemljospoja i, u nešto manjoj meri, nazivni napon mreže. Od osetnog je uticaja, razume se, i način uzemljenja neutralne tačke mreže, tačnije da li je ova izolovana ili kompenzovana. Kompenzovane mreže, naime, kako se pokazuje u odeljku 4.3, imaju mnogo povoljniji tok povratnog napona.

Preporuke VDE iz oblasti zaštite električnih postrojenja od prenapona [19], graničnom strujom zemljospoja u izolovanoj mreži, pri kojoj se sa dovoljnom sigurnošću može očekivati samogašenje, smatraju 3 A.

Odredbe VDE u oblasti mera pri uticajima energetskih vodova na telekomunikaciona postrojenja [20, 21], izašle znatno kasnije od ranije pomenutih VDE preporuka, granične struje samogašenja daju u obliku dijagrama, u zavisnosti od nazivnog napona mreže (sl. 3.14).



Sl. 3.14

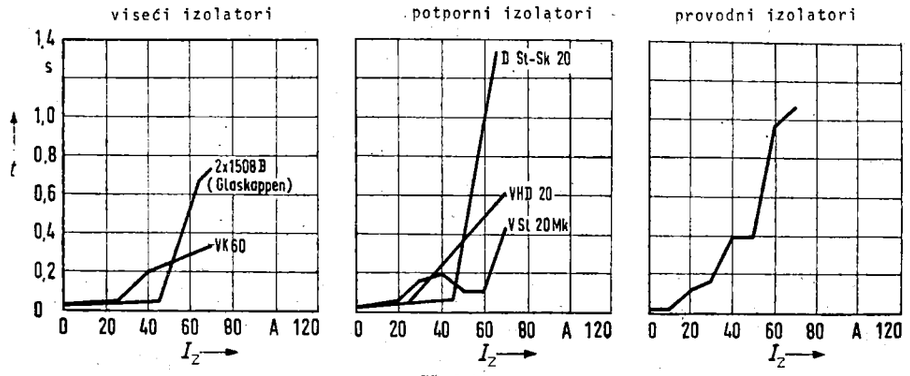
Kriva »*a*« primenjuje se na kompenzovane, a kriva »*b*« na izolovane mreže. Kriva »*a*« se može koristiti i za izolovane mreže do 15 kV, ako su ove pretežno kablovske.

Vrednosti na ordinati dijagrama odnose se na struje kroz mesto kvara. Kod izolovanih mreža pomenuta je struja jednaka struji jednofaznog zemljospoja.

Kako se sa sl. 3.14 vidi, prema novijim VDE odredbama granične struje samogašenja znatno su veće od 3 A.

Dijagrami na sl. 3.14 u dobroj su saglasnosti sa rezultatima niza eksperimenata na mreži i pogonskim iskustvima.

Na sl. 3.15 i 3.16 prikazani su rezultati eksperimenata sa zemljospojevima u mrežama 20 kV područja Karlsruea (Karlsruhe) i Štutgarta (Stuttgart) u SR Nemačkoj [22]. Ukupna dužina vodova mreža koje su ispitivane iznosila je oko

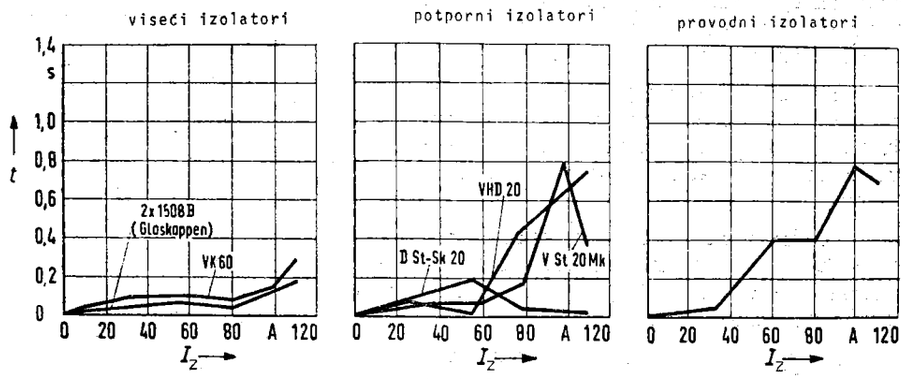


Sl. 3.15

600 km od čega je udeo kablova bio 20%. Mreže u normalnom pogonu rade sa kompenzacijom struje zemljospoja. Da bi se na mestu kvara približno postigli uslovi koji se imaju kod izolovanih mreža, kapacitivna struja kvara podešena je regulacijom kompenzacione prigušnice. Aktivna komponenta struje kvara regulisana je preko otpornika vezanog paralelno sa prigušnicom (sl. 3.17).

Jednofazni zemljospojevi su uspostavljeni na visećim, potpornim i provodnim izolatorima raznih tipova. U eksperimentima su kod različitih vrednosti struja

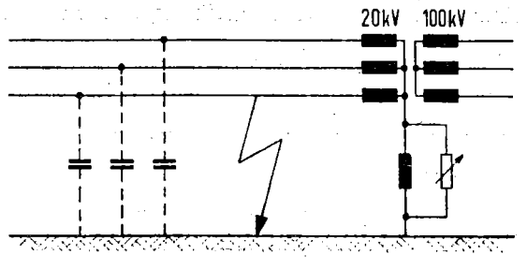
zemljospojeva merena vremena potrebna za samogašenja luka. Da bi se dobile pouzdane srednje vrednosti ovih vremena izvedeno je ukupno oko 600 eksperimenata.



Sl. 3.16

Dijagrami na sl. 3.15 daju srednja vremena samogašenja luka za slučaj kada su struje zemljospoja kapacitivne, što odgovara prilikama koje se imaju kod izolovanih mreža.

Na sl. 3.16 su prikazani rezultati merenja kada su struje zemljospoja čisto aktivne, što se ima kod tačno kompenzovanih mreža.



Sl. 3.17

Iz navedenih rezultata se može videti da su se kapacitivne struje gasile u toku 1 s u svim slučajevima pri vrednostima do 60 A. Kod struja zemljospoja aktivnog karaktera ova je granica iznosila čak 100—120 A.

U mrežama 25 kV područja Hamburga (Hamburg) koje su radile sa izolovanom neutralnom tačkom, zabeleženo je, ilustracije radi, u četvorogodišnjem periodu 11 jednofaznih zemljospojeva [26]. Od navedenih kvarova je čak 6 bilo samogasećih, iako su struje zemljospoja mreža bile od 25 do 250 A.

Slični podaci imaju se i o mnogim drugim mrežama. Pri tom treba imati u vidu da je stvarni broj samogasećih zemljospojeva i veći od brojeva koji se navode u statistikama za pojedine mreže, pošto mnogi ostaju, zbog kratkotrajnosti, nezabeleženi (Poglavlje 8).

Iz navedenih podataka može se procenti da su granične struje samogašenja znatno veće od 3 A i da dijagrami na sl. 3.14 mogu poslužiti kao dobra orijentacija u ovom pogledu.

3.3. PRELAZNI PRENAPONI KOD ZEMLJOSPOJA

3.3.1. VREMENSKI TOK NAPONA

Posle uspostavljanja nultog potencijala na fazi pogođenoj kvarom, dolazi do naglog opterećivanja ispravnih faza koje se sada napajaju složenim, međufaznim naponima. Prelaz na novo stacionarno stanje praćen je po pravilu oscilatornim prelaznim procesima koji, sabirajući se sa naponima napajanja, prouzrokuju prenapone na ispravnim fazama.

Maksimalne vrednosti pomenutih prenapona uslovljene su na složen način od trenutka nastanka zemljospoja, parametara mreže, mesta kvara i prilika na mestu kvara.

Da bi se dobila dobra ocena o uticajima svih pomenutih činilaca, ustanovićemo vremenski tok napona ispravnih faza posle nastanka jednofaznog zemljospoja na fazi »*a*« u mreži prema sl. 3.7. Pretpostavlja se, kao i u odeljku 3.2, da je otpor električnog luka na mestu kvara zanemarljivo mali, a kvar stabilan.

Ekvivalentne šeme mreže za proračun impedansi $\tilde{z}_\alpha$ i $\tilde{z}_0$ za razmatrano mesto kvara poklapaju se sa šemama na sl. 3.8 i sl. 3.9. Ovog ćemo puta, jednostavnosti radi, zanemariti r, L parametre vodova koji su od drugorazrednog uticaja na karakter proučavanih procesa.

Posle unetih uprošćenja, iz šema na sl. 3.8 i sl. 3.9 se dobija

$$\tilde{z}_\alpha = \frac{r + sL}{s^2 LC + s(Cr + GL) + 1 + rG}, \tag{3.57}$$

$$\tilde{z}_0 = \frac{1}{G_0 + sC_0}. \tag{3.58}$$

Pretpostavimo da je napon faze »*a*« u režimu bez kvara oblika

$$u_{ra} = \sqrt{2}\, U_{nf} \sin(\omega t + \varphi). \tag{3.59}$$

Tada će biti (tabela I. 2)

$$\tilde{u}_{ra} = \sqrt{2}\, U_{nf} \frac{\omega \cos\varphi + s \sin\varphi}{s^2 + \omega^2}. \tag{3.60}$$

Na osnovu opšte formule (1.25) dobija se, s obzirom na (3.57), (3.58) i (3.60),

$$\tilde{u}_b'' = \tilde{u}_c'' = -\sqrt{2}\, U_{nf} \frac{C - C_0}{2C_0 + C} \frac{\omega \cos\varphi + s \sin\varphi}{s^2 + \omega^2} \frac{M(s)}{N(s)} \tag{3.61}$$

gde smo označili

$$M(s) = s^2 + s\left(\frac{r}{L} + \frac{G - G_0}{C - C_0}\right) + \frac{1}{L(C - C_0)} + \frac{r}{L}\frac{G - G_0}{C - C_0}, \tag{3.62}$$

$$N(s) = s^2 + 2\delta_1 s + \delta_1^2 + \omega_1^2. \tag{3.63}$$

Ovde je

$$\delta_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{r}{L} + \frac{2G_0 + G}{2C_0 + C}\right), \tag{3.64}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_{i1}^2 - \frac{1}{4}\left(\frac{r}{L} - \frac{2G_0 + G}{2C_0 + C}\right)^2} \tag{3.65}$$

i

$$\omega_{i1} = \frac{1}{\sqrt{L(2C_0 + C)}}. \tag{3.66}$$

Kada se na (3.61) primeni formula (I. 38) za inverziju u vremensko područje, ima se

$$u_b'' = u_c'' = -\sqrt{2}\,U_{nf}\frac{C - C_0}{2C_0 - C}\left[\mathrm{Re}\left\{\frac{\omega\cos\varphi + j\omega\sin\varphi}{j\omega}\,\frac{M(j\omega)}{N(j\omega)}\,e^{j\omega t}\right\}\right.$$

$$\left. + \mathrm{Re}\left\{\frac{\omega\cos\varphi + j\omega_1\sin\varphi}{(\omega^2 - \omega_1^2)\,j\omega_1}\,M(j\omega_1)\,e^{j\omega_1 t}\right\}e^{-\delta_1 t}\right]. \tag{3.67}$$

Ako se zanemari uticaj aktivnih otpornosti i odvodnosti u $M(j\omega)$, $N(j\omega)$ i $M(j\omega_1)$, čime se unekoliko povećavaju prenaponi, iz (3.67) se, posle sređivanja, dobija

$$u_b'' = u_c'' = -\sqrt{2}\,U_{nf}\sin(\omega t + \varphi) + \sqrt{2}\,U_{nf}k_c k_\omega e^{-\delta_1 t}\left[\sin\varphi\cos\omega_1 t + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\cos\varphi\sin\omega_1 t\right]. \tag{3.68}$$

Ovde smo označili:

$$k_c = \frac{3C_0}{2C_0 + C}. \tag{3.69}$$

$$k_\omega = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2} \tag{3.70}$$

Stvarni naponi faza »*b*« i »*c*« dobijaju se kada se komponenti (3.68) dodaju naponi ovih faza u režimu bez zemljospoja, u skladu sa (1.28) i (1.29).

Ako se zanemari uticaj gubitaka, saglasno (3.65) i (3.66) biće

$$\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 \approx \left(\frac{\omega}{\omega_{i1}}\right)^2 = \omega L\cdot\omega(2C_0 + C),$$

ili

$$\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 \approx \frac{(2C_0 + C)\,\omega\,U_{nf}}{\frac{U_{nf}}{\omega L}} \approx \frac{3\,\omega\,C_0\,U_{nf}}{\frac{U_{nf}}{\omega L}} = \frac{I_c}{I_{(3)}} \ll 1. \tag{3.71}$$

U (3.71) je sa $I_{(3)}$ označena struja trofaznog kratkog spoja na napojnim sabirnicama.

S obzirom na (3.71) član sa $(\omega/\omega_1)^2$ u (3.68) može se izostaviti, tako da se konačno ima

$$u_b = \sqrt{2}\,U_{nf}\left[\sqrt{3}\sin\left(\omega t + \varphi - \frac{5\pi}{6}\right) + k_c k_\omega e^{-\delta_1 t}\sin\varphi\cos\omega_1 t\right] \tag{3.72}$$

$$u_c = \sqrt{2}\,U_{nf}\left[\sqrt{3}\sin\left(\omega t + \varphi + \frac{5\pi}{6}\right) + k_c k_\omega e^{-\delta_1 t}\sin\varphi\cos\omega_1 t\right]. \tag{3.73}$$

Kako se iz dobijenih izraza vidi, na stacionarne komponente napona u zemljospoju, superponiraju se prolazne brzo promenljive komponente kružne učestanosti ω_1.

3.3.2. MAKSIMALNE VREDNOSTI NAPONA

Za praktična razmatranja važno je ustanoviti maksimalne vrednosti izračunatih napona da bi se procenila moguća naprezanja izolacije.

Iz (3.72) i (3.73) može se proceniti da će se maksimalni prenaponi imati ako do zemljospoja faze »*a*« dođe u trenutku kada napon ove faze dostigne maksimalnu vrednost. Zaista, u pomenutom je slučaju $\varphi = \pm\pi/2$ i brzo promenljiva komponenta ima najveće amplitude.

Na sl. 3.18 prikazan je, primera radi, tok napona na mestu kvara za slučaj $\varphi = -\pi/2$.

Kako se vidi, nešto viši prenaponi dostižu se na fazi koja prednjači fazi u kvaru, što je u posmatranom slučaju faza »*c*«, pošto se kvar dešava kada je stacionarna komponenta napona ove faze u porastu.

Lako se pokazuje da bi se iste prilike imale i u slučaju $\varphi = \pi/2$, kada bi naponi u prvoj poluperiodi bili negativnog polariteta.

Maksimalna vrednost napona »kritične« faze »*c*« dostiže se praktično u trenutku kada brzo promenljiva komponenta postigne svoju amplitudu koja je jednakog polariteta kao stacionarna komponenta.

Napon faze »*c*«, za $\varphi = -\pi/2$, ima, saglasno (3.73), sledeći vremenski tok

$$u_c = \sqrt{2}\,U_{nf}\left[\sqrt{3}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) - k_c k_\omega e^{-\delta_1 t}\cos\omega_1 t\right]. \tag{3.74}$$

Svoju maksimalnu vrednost napon »u_c« postiže, prema tome, približno u trenutku $t = t_1$ koji se određuje iz uslova

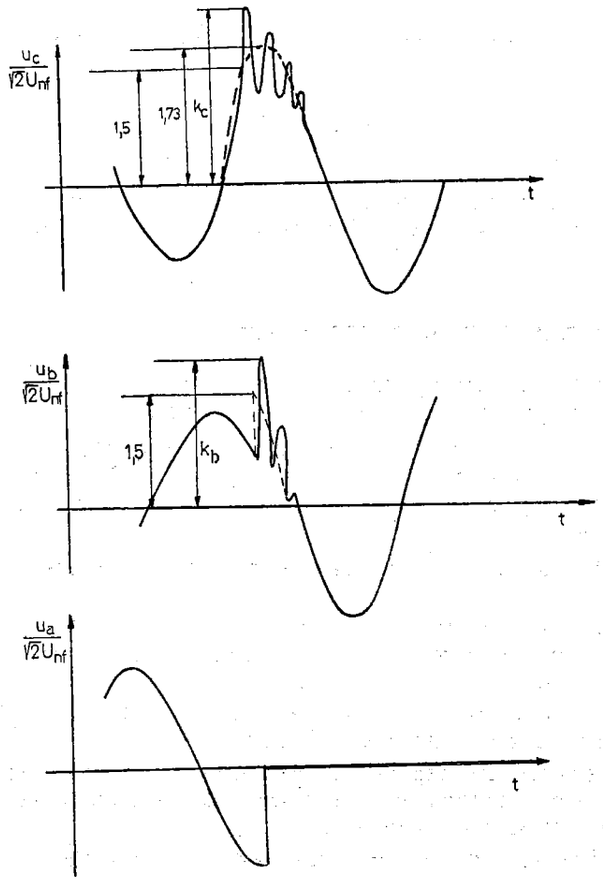
$$\cos\omega_1 t_1 = -1. \tag{3.75}$$

Iz (3.75) sledi

$$t_1 = \frac{\pi}{\omega_1}. \tag{3.76}$$

Maksimalna vrednost napona u_c je tako

$$u_{cm}=|u_c|_{t=t_1}=\sqrt{2}\,U_{nf}\left[\sqrt{3}\sin\left(\frac{\omega}{\omega_1}\pi+\frac{\pi}{3}\right)+k_c k_\omega e^{-\delta_1\frac{\pi}{\omega_1}}\right]. \tag{3.77}$$



Sl. 3.18

Za maksimalnu vrednost napona faze »*b*« dobija se uz iste pretpostavke, a s obzirom na (3.72) i (3.76),

$$u_{bm}=|u_b|_{t=t_1}=\sqrt{2}\,U_{nf}\left[\sqrt{3}\sin\left(\frac{\omega}{\omega_1}\pi+\frac{2\pi}{3}\right)+k_c k_\omega e^{-\delta_1\frac{\pi}{\omega_1}}\right] \tag{3.78}$$

Faktor prenapona pri nastanku zemljospoja može se, u skladu sa (3.77), izračunati kao

$$k=\frac{u_{cm}}{\sqrt{2}\,U_{nf}}=\sqrt{3}\sin\left(\frac{\omega}{\omega_1}\pi+\frac{\pi}{3}\right)+k_c k_\omega e^{-\delta_1\frac{\pi}{\omega_1}}. \tag{3.79}$$

S obzirom na (3.71), iz (3.77) do (3.79) dolazi se do približne relacije

$$u_{cm}\approx u_{bm}\approx\sqrt{2}\,U_{rf}(1{,}5+K), \tag{3.80}$$

gde smo označili

$$K=k_c k_\omega e^{-\delta_1\frac{\pi}{\omega_1}}. \tag{3.81}$$

Prvi član u (3.80) predstavlja stacionarne vrednosti napona ispravnih faza pri zemljospoju, u trenutku nastanka zemljospoja (sl. 3.18).

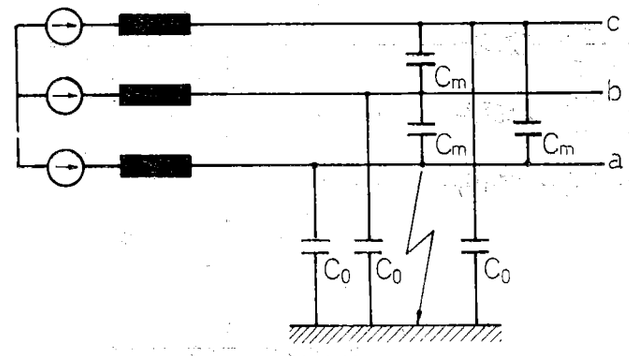
Kako se vidi iz (3.80), za sačinilac k može se pisati, uz pretpostavku $k_\omega\approx 1$,

$$k<1{,}5+k_c\leqslant 2{,}5 \tag{3.82}$$

Kod vazdušnih vodova i trofaznih neekranizovanih kablova je $k_c=0{,}75\div 0{,}85$ tako da je k još manje.

3.3.3. UPROŠĆENO FIZIČKO TUMAČENJE PRENAPONSKIH POJAVA PRI NASTANKU ZEMLJOSPOJA

Ako se vodovi predstave približno, samo preko kapaciteta, mreža u zemljospoju može se analizirati prema šemi sa sl. 3.19.



Sl. 3.19

Posle nastanka zemljospoja faza »*a*« dovodi se na nulti potencijal. Ovim se, kako se vidi sa sl. 3.19, međusobni kapaciteti ispravnih faza vezuju paralelno sa nultim kapacitetima pomenutih faza, što dovodi do praktično trenutne preraspodele opterećenja na kapacitetima. Šema na sl. 3.19 prevodi se formalno u šemu na sl. 3.20. Početne vrednosti napona faza b i c određuju se iz uslova invarijantnosti ukupnog opterećenja pre i posle nastanka kvara. Tako se, na primer, za fazu c može pisati

$$u_c(0_+)(C_0+C_m)=C_m\,u_{ca}(0_-)+C_0\,u_c(0_-) \tag{3.83}$$

U (3.83) $u_{ca}(0_-)$ i $u_c(0_-)$ predstavljaju napone faze »*c*« prema fazi »*a*« i zemlji neposredno pre zemljospoja, respektivno. Sa $u_c(0_+)$ označena je početna vrednost napona faze »*c*« posle pojave kvara.

Kako je

$$u_{ca}(0_-) = u_c(0_-) - u_a(0_-) \tag{3.84}$$

iz (3.83) se dolazi do relacije

$$u_c(0_+) = u_c(0_-) - (1-k_c)\, u_a(0_-). \tag{3.85}$$

U (3.85) k_c ima isto značenje kao u (3.69). Pri tom treba imati u vidu da je

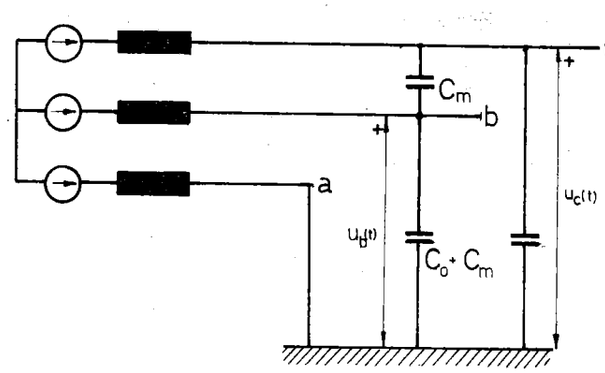
$$C = C_0 + 3\, C_m. \tag{3.86}$$

Na isti se način dolazi i do odgovarajućeg izraza za napon faze »*b*«

$$u_b(0_+) = u_b(0_-) - (1-k_c)\, u_a(0_-). \tag{3.87}$$

Naponi $u_c(0_+)$ i $u_b(0_+)$ razlikuju se od stacionarnih vrednosti napona ovih faza u šemi na sl. 3.20, određenih e. m. s.—*ma* izvora. Usled toga će na pomenutim fazama (kapacitetima $C_0 + C_m$) doći do prelaznih oscilacija napona oko stacionarnih vrednosti. Naponi razmatranih faza menjaće se tako približno po zakonu (sl. 3.20)

$$u_k(t) \underset{t\geq 0}{=} u_{k\infty}(t) + k_\omega \left(u_k(0_+) - u_{k\infty}(0_+)\right) e^{-\delta_1 t} \cos \omega_1 t. \tag{3.88}$$



Sl. 3.20

U (3.88) sa $u_{k\infty}(t)$ označeni su stacionarni naponi ispravnih faza u šemi sa zemljospojem. Parametri k_ω, δ_1 i ω_1 imaju isto značenje kao u (3.72) i (3.73).

S obzirom na (3.85) i (3.87) ima se

$$u_k(0_+) - u_{k\infty}(0_+) = u_k(0_-) - \underset{k=b,\,c}{u_a(0_-)} + k_c\, u_a(0_-) - u_{k\infty}(0_+) = k_c\, u_a(0_-) \tag{3.89}$$

Ovde treba imati u vidu da razlika napona ispravne faze i faze »*a*« pre kvara predstavlja stacionarni napon ispravne faze posle kvara, tako da je

$$u_k(0_-) - u_a(0_-) - \underset{k=b,\,c}{u_{k\infty}(0_+)} = 0 \tag{3.90}$$

Saglasno (3.89) izraz (3.88) postaje

$$u_k(t) \underset{t\geq 0}{=} u_{k\infty}(t) + k_\omega \underset{k=b,\,c}{k_c\, u_a(0_-)}\, e^{-\delta_1 t} \cos \omega_1 t. \tag{3.91}$$

Formula (3.91) u skladu je sa relacijama (3.72) i (3.73), izvedenim primenom α, β, 0 komponenti. Treba uočiti da ovog puta nisu učinjene nikakve pretpostavke o vremenskom toku napona u_k, $k=a, b, c$, sem relacije (3.90), tako da (3.91) važi i kada naponi u_k, pored naizmenične, sadrže i jednosmernu komponentu.

Na osnovu istih pretpostavki kao kod izvođenja (3.80), iz (3.91) se dolazi do sledećih ocena maksimalnih vrednosti napona ispravnih faza

$$u_{km} \approx \left| u_{k\infty}(0_+) - K u_a(0_-) \right|_{k=b,\,c}. \tag{3.92}$$

Ako do zemljospoja dođe pri prolasku naizmenične komponente napona u_a kroz maksimum, imaće se, analogno (3.80),

$$u_{km} = 1{,}5 \sqrt{2}\, U_{nf} + K \left| u_a(0_-) \right|. \tag{3.93}$$

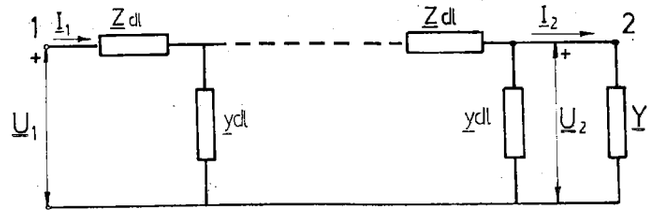
Napon u_{km} je pri tom suprotnog polariteta od $u_a(0_-)$.

3.3.4. PRENAPONI NA KRAJEVIMA DUŽIH VODOVA

Na krajevima dužih vodova može da dođe do izvesnog dodatnog povišenja prelaznih napona na ispravnim fazama u odnosu na vrednosti koje ovi naponi imaju na mestu zemljospoja. Pomenuto povišenje napona posledica je približavanja kružne učestanosti ω_1 brzo promenljivih komponenti napona rezonantnim učestanostima voda.

U našim ćemo analizama, jednostavnosti radi, brzo promenljive komponente napona smatrati praktično prostoperiodičnim veličinama.

Vrednost pomenutih komponenti na krajevima vodova mogu se tako izračunati primenom metode kompleksnih amplituda, prema šemi na sl. 3.21. Na sl. 3.21 je



Sl. 3.21

sa »1« označeno mesto kvara, a sa »2« kraj voda na koji je priključena admitansa opterećenja $\underline{Y} = Ye^{j\gamma}$. Parametri $\underline{z}$ i $\underline{y}$ predstavljaju rednu impedansu i otočnu admitansu voda po jedinici dužine, pri kružnoj učestanosti ω_1

$$\underline{z} = r_v + j\, \omega_1\, L_v \tag{3.94}$$

$$\underline{y} = g_v + j\, \omega_1\, C_v \tag{3.95}$$

Ovde su sa r_v i L_v označeni aktivna otpornost i induktivnost, a sa g_v i C_v odvodnost i kapacitet voda po jedinici dužine za odgovarajući redosled.

Analiza napona izvršiće se odvojeno za α i 0 redosled pošto se parametri voda za ova dva redosleda međusobno, kao što je poznato (prilog II), osetno razlikuju.

Između napona na početku i kraju voda postoji poznata relacija [65]

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch}(\sqrt{\underline{z}\,\underline{y}}) + \underline{I}_2 \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} \operatorname{sh}(\sqrt{\underline{z}\,\underline{y}}\, l) \tag{3.96}$$

Ako se ima u vidu da je

$$\underline{I}_2 = \underline{Y}\, \underline{U}_2, \tag{3.97}$$

iz (3.96) se dobija

$$\underline{U}_2 = \underline{M}\, \underline{U}_1. \tag{3.98}$$

gde smo označili

$$\underline{M} = \left[\operatorname{ch}(\sqrt{\underline{z}\,\underline{y}}) + \underline{Y} \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} \operatorname{sh}(\sqrt{\underline{z}\,\underline{y}}) \right]^{-1}. \tag{3.99}$$

Na osnovu (3.98) zaključuje se da između brzo promenljive komponente napona α-redosleda na mestu kvara, $\underline{U}_{1\alpha}$, i odgovarajuće komponente na kraju voda, $\underline{U}_{2\alpha}$, postoji veza

$$\underline{U}_{2\alpha} = \underline{M}_\alpha\, \underline{U}_{1\alpha}. \tag{3.100}$$

Slična veza postoji i između brzo promenljive komponente nultog redosleda

$$\underline{U}_{20} = \underline{M}_0\, \underline{U}_{10}. \tag{3.101}$$

U (3.100) i (3.101) sačinioci $\underline{M}_\alpha$ i $\underline{M}_0$ računaju se prema opštoj formuli (3.99) kada se u ovu uvrste parametri $\underline{z}_\alpha$, $\underline{y}_\alpha$, $\underline{Y}_\alpha$ odnosno $\underline{z}_0$, $\underline{y}_0$, $\underline{Y}_0$, respektivno.

Brzo promenljive komponente napona faza »*b*« i »*c*« na kraju voda, pri zemljospoju faze »*a*«, jednake su, saglasno (II. 17), pošto kod jednofaznog zemljospoja ne postoje veličine β-redosleda,

$$\underline{U}_{2b} = \underline{U}_{2c} = -\frac{\underline{U}_{2\alpha}}{2} + \underline{U}_{20}. \tag{3.102}$$

Ako se ima u vidu da je na mestu kvara

$$\underline{U}_{1a} = \underline{U}_{1\alpha} + \underline{U}_{10} = 0, \tag{3.103}$$

iz (3.102) se, u skladu sa (3.100) i (3.101), dobija

$$\underline{U}_{2b} = \underline{U}_{2c} = \underline{M}_e\, \underline{U}_{10}, \tag{3.104}$$

gde smo označili

$$\underline{M}_e = \frac{\underline{M}_\alpha}{2} + \underline{M}_0. \tag{3.105}$$

Nulta komponenta napona na mestu kvara može se izračunati, saglasno (II. 12), kao

$$\underline{U}_{10} = \frac{1}{3}(\underline{U}_{1a} + \underline{U}_{1b} + \underline{U}_{1c}). \tag{3.106}$$

Brzo promenljive komponente napona faza »*b*« i »*c*« međusobno su jednake, kako se vidi iz (3.72) i (3.73). Ako se $\underline{U}_{1b}$ i $\underline{U}_{1c}$ usvoje kao referentne veličine za proračun faznih stavova, saglasno (3.74) se ima

$$\underline{U}_{1b} = \underline{U}_{1c} = -K\sqrt{2}\, U_{nf}. \tag{3.107}$$

Iz (3.106) se, s obzirom na (3.103) i (3.107), dobija

$$\underline{U}_{10} = -\frac{2}{3} K\sqrt{2}\, U_{nf}. \tag{3.108}$$

Na osnovu (3.104) i (3.108) može se pisati

$$\underline{U}_{2b} = \underline{U}_{2c} = -\frac{2}{3} M_e K\sqrt{2}\, U_{nf} e^{j\psi}, \tag{3.109}$$

gde je

$$\psi = \arg\{\underline{M}_e\}. \tag{3.110}$$

Ako se učini pretpostavka da se komponente napona radne učestanosti na kraju voda poklapaju sa ovim veličinama na mestu kvara, što odgovara realnim uslovima, za prelazne napone kraju voda se, na osnovu (3.72), (3.73) i (3.109) dobija, za $\varphi = -\frac{\pi}{2}$,

$$u_b = \sqrt{2}\, U_{nf}\left[\sqrt{3}\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{2}{3} M_e k_c k_\omega e^{-\delta_1 t}\cos(\omega_1 t + \psi)\right] \tag{3.111}$$

$$u_c = \sqrt{2}\, U_{nf}\left[\sqrt{3}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) - \frac{2}{3} M_e k_c k_\omega e^{-\delta_1 t}\cos(\omega_1 t + \psi)\right]. \tag{3.112}$$

Maksimalna vrednost napona u fazama postižu se približno u trenutku t_1 kada je $\omega_1 t_1 + \varphi = \pi$, odnosno

$$t_1 = \frac{\pi - \psi}{\omega_1}. \tag{3.113}$$

Pomenute maksimalne vrednosti iznose:

$$u_{bm} = \sqrt{2}\, U_{nf}\left[\sqrt{3}\sin\left(\omega t_1 + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{2}{3} M_e k_c k_\omega e^{-\delta_1 t_1}\right], \tag{3.114}$$

$$u_{cm} = \sqrt{2}\, U_{nf}\left[\sqrt{3}\sin\left(\omega t_1 + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{2}{3} M_e k_c k_\omega e^{-\delta_1 t_1}\right]. \tag{3.115}$$

Poređenjem izraza (3.114) i (3.115) sa (3.77) i (3.78) vidi se da do značajnijeg povećanja prelaznog napona na ispravnim fazama na krajevima vodova u odnosu na ove napone na mestu kvara može da dođe kada je sačinilac $\frac{2}{3} M_e$ osetno veći od 1.

Ako se zanemare otpornosti i odvodnosti voda i pretpostavi da je ovaj u praznom hodu, parametar M_e postaje čisto realan broj i ima vrednost (relacije (3.96) i (3.105))

$$M_e = \frac{1}{2\cos(\omega_1 \sqrt{L_v C_v}\, l)} + \frac{1}{\cos(\omega_1 \sqrt{L_{vo} C_{vo}}\, l)}. \tag{3.116}$$

S obzirom na visoke vrednosti ω_1, u prvoj približnosti može se smatrati da je (Tačka 1.1.2)

$$\sqrt{L_v C_v} \approx \sqrt{L_{vo} C_{vo}}. \tag{3.117}$$

Ako pri tom imamo u vidu i (1.46), izraz (3.116) postaje

$$M_e = \frac{3}{2} \frac{1}{\cos \frac{\omega_1}{v} l}. \tag{3.118}$$

Kako se vidi iz (3.118), znatne, teorijski beskonačne vrednosti, sačinilac M_e dobija kada je

$$\frac{\omega_1}{v} l = (2n+1)\frac{\pi}{2}, \quad n = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots \tag{3.119}$$

Kritične dužine voda su, prema (3.119),

$$l_k = \frac{v}{\omega_1} \frac{\pi}{2} (2n+1). \tag{3.120}$$

Ako se izraz na desnoj strani (3.120) pomnoži i podeli sa ω i stavi $\omega = 2\pi \cdot 50 = 100\pi\ \mathrm{s}^{-1}$, dobija se

$$l_k = \frac{\omega}{\omega_1} \frac{v}{200} (2n+1). \tag{3.121}$$

Iz (3.121) mogu se izvesti praktične formule za l_k za vazdušne i kablovske vodove, s obzirom na (3.71), (1.47) i (1.49).

Za vazdušne vodove se dobija

$$l_k \approx 1500 \sqrt{\frac{I_c}{I_{(3)}}} (2n+1)\ \mathrm{km}, \tag{3.122}$$

a za kablovske,

$$l_k \approx (500 \div 750) \sqrt{\frac{I_c}{I_{(3)}}} (2n+1)\ \mathrm{km}. \tag{3.123}$$

Neka, primera radi, određena mreža ima $I_{(3)} = 10\ \mathrm{kA}$ i $I_c = 50\ \mathrm{A}$. Kritične dužine vazdušnog voda bile bi, za $n = 0$,

$$l_k = 1500 \sqrt{\frac{50}{10\,000}} = 106{,}1\ \mathrm{km},$$

a za $n = 1$

$$l_k = 318{,}3\ \mathrm{km}.$$

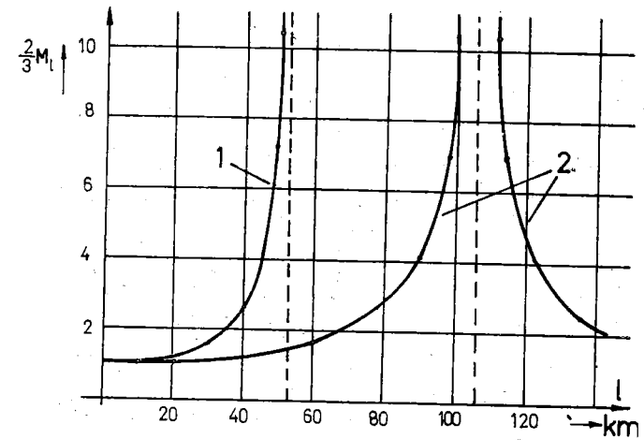
Za kablovski vod ima se, pri $n = 0$,

$$l_k = (500 \div 700) \sqrt{\frac{50}{10\,000}} = 35{,}4 \div 53\ \mathrm{km}.$$

Pošto je usvojeno da kapacitivna struja mreže iznosi 50 A, to ona sigurno ne sadrži kablovske vodove sa dužinama bliskim kritičnim za $n > 0$.

U praktičnim uslovima ređe se sreću radijalni pravci vodova sa navedenim dužinama, mada nisu isključeni.

Na sl. 3.22 prikazane, su u vidu dijagrama, vrednosti parametara $\frac{2}{3} M_e$ iz razmatranog primera za kablovske (kriva 1) i vazdušne vodove (kriva 2) različitih dužina.



Sl. 3.22

U realnim uslovima porast napona kod rezonantnih učestanosti ograničava više faktora. U ove treba ubrajati aktivne otpornosti i odvodnosti vodova, pri čemu ove prve imaju povećane vrednosti usled skin-efekta kod visokih ω_1, zatim admitansu potrošača na prijemnom kraju. I u slučaju kada je vod neopterećen, značajan uticaj na prigušenje razmatranih prenapona može imati prijemni transformator na kraju voda čija se induktivnost magnećenja brzo smanjuje sa porastom napona, usled zasićenja.

3.4. INTERMITENTNI PRENAPONI

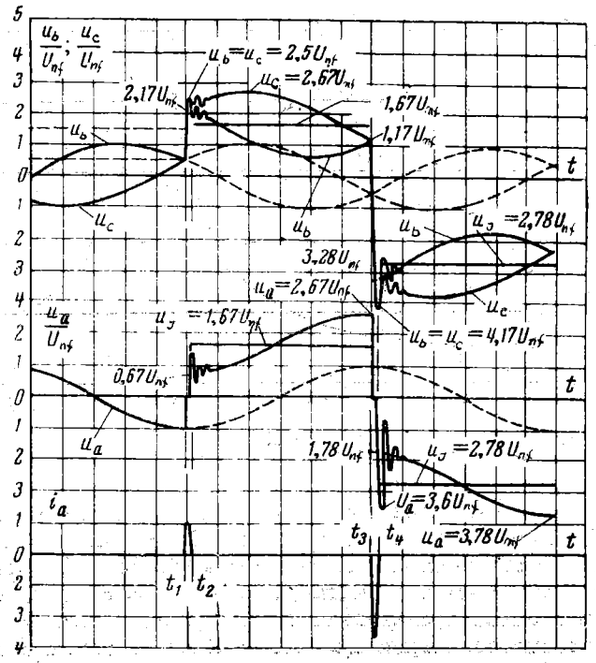
U izvesnim slučajevima, posebno kod manjih vrednosti struja jednofaznih zemljospojeva, može doći do višestrukog uzastopnog paljenja i gašenja električnog luka na mestu kvara. Pomenuta pojava često dovodi do znatnih prenapona, kako na ispravnim fazama, tako i na fazi pogođenoj kvarom. Pomenuti prenaponi posledica su superpozicije naizmeničnih komponenti napona normalne i povišene učestanosti, do kojih dolazi pri svakom paljenju luka, na jednosmernu komponentu zaostalu kod prethodnog gašenja luka. Zbog načina nastanka, razmatrani prenaponi nazivaju se, kako je to u literaturi uobičajeno, »intermitentni prenaponi«.

Opisana pojava vrlo je teška za tačniju analizu zbog neodređenosti i složenosti uslova na mestu kvara od kojih zavise osnovni parametri električnog luka: napon paljenja i gašenja i električni otpor.

Postoji nekoliko teorija koje pokušavaju da objasne tok uspostavljanja intermitentnih prenapona. Mi ćemo ukratko prikazati dve ovakve teorije koje, kada se uvaže svi bitni prigušujući uticaji koji se imaju u realnim mrežama, daju dobre procene maksimalnih vrednosti prenapona.

3.4.1. TEORIJA PETERSENA

Po teoriji Petersena (Petersen) do paljenja električnog luka na mestu zemljospoja dolazi uvek u trenutku kada napon faze na kojoj se pojavio kvar ima maksimalnu vrednost, a do gašenja, u trenutku prvog prolaska brzo promenljive komponente struje zemljospoja kroz nulu.



Sl. 3.23

Pretpostavimo da je kvarom pogođena faza »*a*« mreže. Tokovi napona sve tri faze i struje zemljospoja pri intermitententnim zemljospojevima prema teoriji Petersen-a prikazani su na sl. 3.23 [17].

U trenutku t_1 došlo je do prvog paljenja luka, a u trenutku t_2, vrlo kratko vreme iza t_1, luk se gasi i pogođena faza izoluje od zemlje.

U trenutku gašenja luka naponi ispravnih faza imaju približno svoje maksimalne vrednosti koje se mogu odrediti primenom relacije (3.80).

$$u_{m1} = (1{,}5 + K)\sqrt{2}\,U_{nf}. \tag{3.124}$$

Indeksom 1 označili smo da je reč o maksimalnom prenaponu posle prvog uspostavljanja kvara.

Posle gašenja struje zemljospoja u mreži se, pored naizmeničnih komponenti napona koje potiču od izvora napajanja, pojavljuje i jednosmerna komponenta uslovljena električnim nabojem kapaciteta ispravnih faza u trenutku gašenja (tačka 3.2.3). Ova je komponenta, saglasno (3.53), jednaka

$$u_{j1} = \frac{2}{3}u_{m1}. \tag{3.125}$$

Napon u_{j1} ima se u svim fazama i predstavlja ujedno i napon neutralne tačke mreže.

Po teoriji Petersena, do ponovnog uspostavljanja zemljospoja doći će u trenutku t_3, kada napon faze »*a*« postigne svoju maksimalnu vrednost (sl. 3.23). Ova će vrednost biti jednaka

$$u_{a1} = \sqrt{2}\,U_{nf} + u_{j1}(1 - d). \tag{3.126}$$

U (3.126) smo faktorom $1-d$ obuhvatili prigušenje jednosmerne komponente u periodu između kvarova, usled odvoda preko izolacije i naponskih mernih transformatora.

Maksimalni napon na fazama *b* i *c* biće sada, s obzirom na (3.93),

$$u_{m2} = 1{,}5\sqrt{2}\,U_{nf} + K\left[\sqrt{2}\,U_{nf} + u_{j1}(1 - d)\right]. \tag{3.127}$$

Posle ponovnog gašenja luka, u trenutku t_4, dolazi do nove preraspodele električnog naboja kapaciteta koja prouzrokuje novu, povećanu jednosmernu komponentu napona.

Opisani procesi nastavljaju se i dalje uz postepeni porast maksimalnih vrednosti prenapona do graničnih vrednosti, koje se dostižu posle više ciklusa paljenja i gašenja.

Maksimalna vrednost prenapona na ispravnim fazama posle, na primer, $n+1$-og paljenja luka jednaka je, analogno (3.127) i (3.125)

$$u_{mn+1} = 1{,}5\sqrt{2}\,U_{nf} + K\left[\sqrt{2}\,U_{nf} + u_{jn}(1 - d)\right], \tag{3.128}$$

gde je

$$u_{jn} = \frac{2}{3}u_{mn}. \tag{3.129}$$

Pretpostavimo da su posle *n*-tog paljenja luka prenaponi dostigli svoju graničnu vrednost.

Tada će biti

$$u_{m_{n+1}} = u_{mn} = u_g. \tag{3.130}$$

Granična vrednost prenapona ispravnih faza dobija se kada se u opšte relacije (3.128) i (3.129) uvrsti (3.130).

Tako se izračunava

$$u_g = \frac{(1{,}5+K)}{1-\frac{2}{3}(1-d)K}\sqrt{2}\,U_{nf}. \tag{3.131}$$

Najveći prenapon na fazi pogođenoj kvarom jednak je

$$u_{kg} = \sqrt{2}\,U_{nf} + u_{jn}(1-d). \tag{3.132}$$

Kada se u (3.132) uvrsti u_{jn} prema (3.128) do (3.130) dobija se, posle sređivanja:

$$u_{kg} = \frac{2-d}{1-\frac{2}{3}(1-d)K}\sqrt{2}\,U_{nf}. \tag{1.133}$$

Dijagrami na sl. 3.23 nacrtani su za slučaj kada nema prigušenja jednosmerne komponente ($d=0$). Takođe je za koeficijent amplitude brzo promenljivih komponenti napona pri nastanku zemljospojeva usvojena vrednost $K=1$, što je nešto više od uobičajenih vrednosti ovog parametra u realnim mrežama. Zbog navedenih uprošćenja dijagrami na slici daju gornje granice prenapona.

Može se uočiti da, prema teoriji Petersena, prenaponi na fazama menjaju polaritet od paljenja do paljenja luka, sa tendencijom postepenog porasta u više uzastopnih ciklusa.

3.4.2. TEORIJA PETERSA I SLIPIJANA

Po teoriji Petersa (Peters) i Slipijana (Slepian) do gašenja luka dolazi uvek pri prolasku kroz nultu vrednost komponente struje zemljospoja radne učestanosti. Pošto se brzo promenljiva komponenta struje zemljospoja jako prigušuje, u pomenutom trenutku jednaka je nuli praktično i ukupna struja zemljospoja.

Po razmatranoj teoriji kvar se ponovo uspostavlja pri svakom prolasku napona faze pogođene kvarom kroz maksimalnu vrednost, znači isto kao po teoriji Petersena.

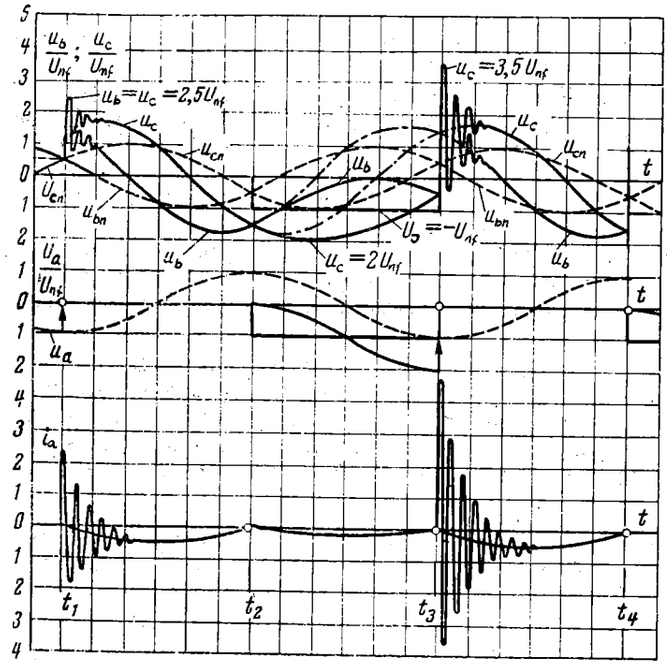
Neka je u trenutku t_1 došlo do prvog zemljospoja faze »*a*« (sl. 3.24) [17]. Maksimalna vrednost prenapona na ispravnim fazama u razmatranom slučaju izračunava se, kao što smo pokazali, prema (3.124).

Do gašenja luka dolazi, prema učinjenoj pretpostavci, u trenutku t_2. Neposredno pre gašenja luka naponi ispravnih faza imali su vrednosti

$$u_b(t_2) = u_c(t_2) = -1{,}5\sqrt{2}\,U_{nf}, \tag{3.134}$$

tako da će se posle gašenja struje zemljospoja, u neutralnoj tački pojaviti jednosmerna komponenta napona (relacija (3.125))

$$u_j = \frac{2}{3}(-1{,}5\sqrt{2}\,U_{nf}) = -\sqrt{2}\,U_{nf}. \tag{3.135}$$



Sl. 3.24

Zemljospoj se ponovo uspostavlja u trenutku t_3 kada faza u kvaru postigne svoju maksimalnu vrednost (sl. 3.24)

$$u_a(t_3) = -[1+(1-d)]\sqrt{2}\,U_{nf}. \tag{3.136}$$

Prema opštoj formuli (3.93), maksimalna vrednost napona na ispravnim fazama usled ponovnog paljenja luka u trenutku t_3 biće jednaka

$$u_m = 1{,}5\sqrt{2}\,U_{nf} + K[1+(1-d)]\sqrt{2}\,U_{nf}. \tag{3.137}$$

Ponovno gašenje luka nastupa u trenutku t_4 kada struja zemljospoja opet prolazi kroz nultu vrednost. Pošto se prilike u mreži u posmatranom trenutku u potpunosti poklapaju sa onima koje se imaju u trenutku t_2, kod drugog paljenja luka, to će se procesi paljenja i gašenja luka nadalje odvijati identično kao u periodu

$t_2 \div t_4$ i neće doći do daljih povišenja napona. Iz rečenog sledi da su, po teoriji Petersa i Slipijana, granične vrednosti napona zdravih faza i faze pogođene kvarom

$$u_g = u_m = (1{,}5 + 2K - Kd)\sqrt{2}\,U_{nf}, \tag{3.138}$$

$$u_{kg} = |u_a(t_3)| = (2 - d)\sqrt{2}\,U_{nf}, \tag{3.139}$$

respektivno.

Dijagrami na slici 3.24 nacrtani su takođe za vrednosti $K=1$ i $d=0$ tako da daju nešto veće prenapone od realnih.

Kako se vidi, po teoriji Petersa i Slipijana maksimalne vrednosti prenapona stalno su istog polariteta a svoju granicu postižu odmah posle drugog paljenja.

3.4.3. INTERMITENTNI PRENAPONI U POGONSKIM USLOVIMA

Kako smo videli, obe teorije intermitentnih prenapona uvažavaju nestabilnost električnog luka na mestu kvara preko jednostavnih idealizovanih šema paljenja i gašenja, bez potpunijeg obuhvatanja karakteristika električnog luka i njegovog otpora.

Teorija Petersena pri tom se u većoj meri može primeniti na analizu pojava kod zemljospoja u tesnim, uskim izolacionim prostorima, natopljenim uljem ili isparljivom izolacionom masom, kakvi su zemljospojevi na kablovima, kablovskim spojnicama i završnicama. Samo u pomenutim uslovima može doći do brzog prinudnog gašenja struje zemljospoja, kakvo pretpostavlja teorija Petersena.

Teorija Petersa i Slipijana odnosi se bliže na kvarove na slobodnom, u vazduhu, gde do prekidanja luka dolazi sporije, pri prirodnom prolasku struje kroz nultu vrednost. Pomenuti kvarovi, inače, nisu po pravilu stabilni zbog izduženja električnog luka, usled termičkih i elektrodinamičkih dejstava struje zemljospoja i vetra, tako da ni ne omogućavaju uspostavljanje ciklusa paljenja i gašenja prema Petersenu.

Obe opisane teorije čine pretpostavku da do ponovnog uspostavljanja kvara dolazi u najnepovoljnijem trenutku, kada napon faze koja prelazi u kvar ima svoju maksimalnu vrednost. U stvarnim uslovima oštećena izolacija na mestu kvara obično se ne može tako brzo oporaviti posle gašenja luka da bi bila u stanju da podnese visoke napone. Do ponovnog uspostavljanja kvara po pravilu dolazi pre nego što napon pogođene faze dostigne svoj maksimum. Ponovni kvar se, prema tome, obično dešava pri nižim vrednostima napona pogođene faze od maksimalnih, što dovodi do manjih prenapona.

Prirodu pojave intermitentnih prenapona pokušao je da protumači i Beljakov [17, 69, 74]. Pomenuti autor je eksperimentima u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom ustanovio da neposredno posle gašenja luka izolacija na mestu kvara ne može da podnese viši napon od reda $(0{,}3 \div 0{,}6)\sqrt{2}\,U_{nf}$. U svojoj teoriji Beljakov je stoga pretpostavio da prenapon na fazi pogođenoj kvarom posle gašenja luka ne prelazi pomenutu početnu dielektričku čvrstoću izolacije, tako da se zemljospoj ne uspostavlja odmah posle gašenja. Do ponovnog paljenja luka dolazi, po pretpostavci, nešto docnije, kada napon faze izložene kvaru dostigne skoro svoju maksimalnu vrednost. Ako do ponovnog kvara dođe u pomenutom najkritičnijem trenutku, prenapon na jednoj od zdravih faza može da dostigne vrednost reda $3{,}2\sqrt{2}\,U_{nf}$.

U tabeli 3.1 smo, orijentacije radi, naveli vrednosti faktora prenapona na ispravnim fazama i fazi sa zemljospojem kod intermitentnih pojava prema teorijama Petersena i Petersa i Slipijena, sa i bez obuhvatanja prigušenja u mreži.

TABELA 3.1

		$k_g = \frac{u_g}{\sqrt{2}\,U_{nf}}$	$k_{kg} = \frac{u_{kg}}{\sqrt{2}\,U_{nf}}$
Petersen	sa prigušenjem	3,51	2,87
	bez prigušenja	7,50	6,0
Peters—Slipijan	sa prigušenjem	2,62	1,8
	bez prigušenja	3,50	2,0

Kod proračuna prenapona uz prigušenje korišćene su relacije izvedene u tački 3.4.2 u kojima je usvojeno $K=0{,}7$ i $d=0{,}2$. Povoljan uticaj na prigušenje prenapona imaju naponski merni transformatori koji odvode jednosmernu komponentu napona i povećavaju sačinilac d.

Na osnovu pogonskih iskustava sa postojećim distributivnim mrežama, intermitentni prenaponi dosta su retki i maksimalne vrednosti napona ispravnih faza, kada do njih dođe, obično nisu veće od $3\sqrt{2}\,U_{nf}$, a sasvim izuzetno se približavaju vrednostima $3{,}5\sqrt{2}\,U_{nf}$.

Razmatrani procesi mogu se pojaviti, kako iskustva pokazuju, kod mreža sa strujama zemljospoja do najviše reda 10 (A), i to obično kod slabo opterećenih kablovskih mreža. Kod malih struja zemljospoja, naime, jedino i postoje uslovi za brzu regeneraciju izolacije na mestu kvara i duže održavanje ciklusa paljenja i gašenja, koji dovode do kulminacije prenapona. Kod vazdušnih mreža luk se daleko teže održava i ponovno uspostavlja zbog ranije navedenih činilaca.

Najveće vrednosti prenapona reda $3{,}5\sqrt{2}\,U_{nf}$ imaju se kod vrlo malih struja zemljospoja i kod troolovnih, ekranizovanih i jednožilnih kablova kod kojih izostaje pozitivan uticaj međusobnih kapaciteta faza (relacija (3.82)).

Kod malih struja zemljospoja, isto tako, veća je verovatnoća da će se oštećena izolacija dovoljno brzo oporaviti da do ponovnih proboja dođe kod visokih vrednosti napona faze sa kvarom, što takođe, kako je pokazano, dovodi do viših prenapona.

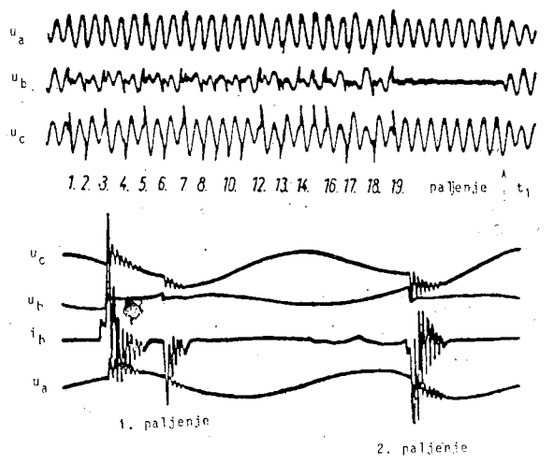
Pojava intermitentnih prenapona u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom ne može se sprečiti nikakvim zaštitnim merama. U javnim distributivnim mrežama pomenuta pojava je vrlo retka, kako smo pomenuli, a prenaponi koji se mogu uspostaviti, ako do nje ipak dođe, nisu toliki da ugrožavaju normalno projektovanu i održavanu mrežu. Oni bi mogli, ako u mreži ima neispravnih i oslabljenih mesta, dovesti do dvostrukih zemljospojeva i drugih višestrukih kvarova.

Gledano u celini, može se proceniti da intermitentni prenaponi ne predstavljaju stvarnu opasnost za javne distributivne mreže, tako da o njima ne treba voditi računa pri određivanju tehničkih granica primenljivosti rešenja sa izolovanom neutralnom tačkom.

Intermitentni prenaponi mogu da predstavljaju stvarnu smetnju u industrijskim mrežama i mrežama sopstvene potrošnje elektrana, koje su po pravilu kablovske

i ograničenih dužina. Ovakve mreže direktno napajaju električne motore koji obično ne mogu da podnesu osetnije prenapone.

Na sl. 3.25 je, ilustracije radi, prikazan oscilogram napona i struja kod intermitentnog zemljospoja, snimljen u mreži 6 kV sopstvene potrošnje elektrane Elba (Elba) u DR Nemačkoj [16]. Mreža je izolovana, sa strujom zemljospoja 1,75 A.



Sl. 3.25

Na gornjem delu slike prikazani su oscilogrami napona faza prema zemlji. U kvaru je faza »*b*«.

Iz toka napona U_c lako se uočava da je došlo do 19 uzastopnih paljenja luka sa vrednostima prenapona do 10,4 kV. Granični faktor prenapona zdravih faza iznosio je prema tome

$$k_g = \frac{10{,}4}{6\sqrt{2}/\sqrt{3}} = 2{,}12.$$

Posle 19. paljenja, zemljospoj se stabilizovao sve do trenutka t_1 kada je usled zamorenosti izolacije, došlo do preskoka sa ispravnih faza na kućišta kod dva asinhrona motora, tako da je kvar prešao u dvostruki zemljospoj, koji je isključila zaštita.

Sa slike se vidi da se pojava nije odvijala strogo ni po jednoj od prikazanih teorija, pošto maksimalni prenaponi nisu imali ni jednaki polaritet niti su ga naizmenično menjali iz cilusa u ciklus.

Na donjem delu slike prikazan je detaljno vremenski tok napona faza i struje zemljospoja u prvom ciklusu intermitencije luka posle nastanka kvara.

3.5. PRENAPONI PRI ISKLJUČIVANJU ZEMLJOSPOJEVA

3.5.1. PREKIDANJE KAPACITIVNIH STRUJA

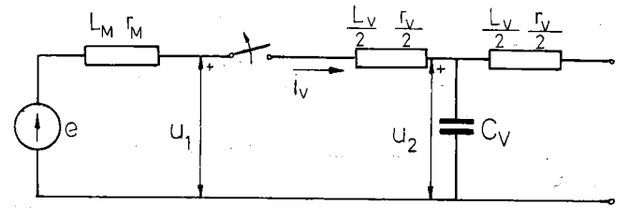
Pri isključivanju jednofaznih zemljospojeva može doći do pojave znatnih prenapona ako prekidači relativno sporo uspostavljaju dielektričnu čvrstoću usled konstruktivnih nedostataka, kvara ili nedovoljnog održavanja. Pomenuta pojava karakteristična je uopšte za prekidanje kapacitivnih struja.

Uzroke nastanka razmatranih prenapona objasnićemo na jednofaznoj šemi prikazanoj na sl. 3.26. Električna mreža sa e. m. s.

$$e = \sqrt{2}\, U_n \cos(\omega t + \varphi) \qquad (3.140)$$

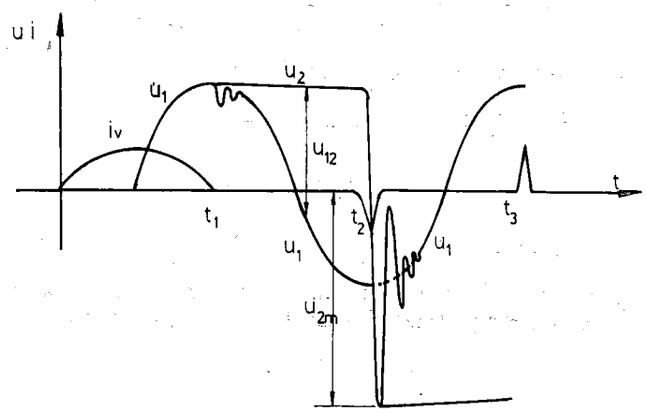
napaja vod u praznom hodu, koji se može približno predstaviti zamenskom T-šemom sa odgovarajućim parametrima r_v, L_v i C_v. Sa L_M označena je ekvivalentna induktivnost napojne mreže.

Struja voda i_v prekida se pri prolasku kroz nultu vrednost, u trenutku t_1 (sl. 3.27). Pošto je struja i_v praktično kapacitivna, napon u_2 će u posmatranom



Sl. 3.26

trenutku imati svoju maksimalnu vrednost koja će se zadržati na vodu odnosno kapacitetu C, blago padajući zbog odvoda prema zemlji.



Sl. 3.27

Posle prekidanja struje, napon u_1 se uz oscilacije neznatnih amplituda, ustaljuje na novoj, nešto nižoj stacionarnoj vrednosti

$$u_1 = e.$$

Do oscilacija dolazi usled uticaja kapaciteta sabirnica postrojenja koje smo, jednostavnosti radi, izostavili iz šeme.

Na sl. 3.27 je pretpostavljeno da se naponi u_1 i u_2 u režimu pre isključenja praktično poklapaju, što i jeste slučaj kod uobičajenih dužina vodova za srednjonaponske mreže.

Napon između kontakata prekidača

$$u_{12} = u_1 - u_2$$

raste postepeno i može da u određenom trenutku postane veći od dielektrične čvrstoće između kontakata prekidača, koja se takođe ne uspostavlja trenutno. Tada on dovodi do ponovnog paljenja luka u prekidaču. Usled ponovnog uspostavljanja luka, u šemi dolazi do udarnog opterećenja kapaciteta C_v koje može dovesti do osetnih prenapona.

Napon na kapacitetu posle proboja u prekidaču određen je relacijom

$$\tilde{e}=(r+sL)\,\tilde{i}_v+\tilde{u}_2 \tag{3.141}$$

gde smo označili

$$r=r_M+\frac{r_v}{2},\qquad L=L_M+\frac{L_v}{2}.$$

Pri tome je, kada sa u_{20} označimo vrednost napona u_2 neposredno pre ponovnog paljenja luka,

$$\tilde{i}_v=sC_v\,\tilde{u}_2-C_v\,u_{20}. \tag{3.142}$$

Ako se $\tilde{i}_v$ prema (3.142) uvrsti u (3.141), dolazi se do sledećeg izraza za $\tilde{u}_2$

$$\tilde{u}_2=\frac{\tilde{e}}{s^2LC_v+sC_vr+1}+u_{20}\,\frac{sLC_v+rC_v}{s^2LC_v+sC_vr+1}. \tag{3.143}$$

Inverzijom u vremensko područje dobija se

$$u_2=\mathcal{L}^{-1}\{\tilde{u}_2\}=\sqrt{2}\,U_n\cos(\omega t+\varphi)-$$
$$-\sqrt{2}\,U_n\left(\cos\varphi\cos\omega_1 t-\frac{\omega}{\omega_1}\sin\varphi\sin\omega_1 t\right)e^{-\delta_1 t}+$$
$$+u_{20}\cos\omega_1 t\,e^{-\delta_1 t}. \tag{3.144}$$

U (3.144) je uticaj otpornosti r obuhvaćen samo preko koeficijenta prigušenja δ_1 pošto ovaj inače nije veliki. Parametri δ_1 i ω_1 jednaki su

$$\delta_1=\frac{1}{2}\,\frac{r}{L}, \tag{3.145}$$

$$\omega_1=\sqrt{\frac{1}{LC_v}-\delta_1^2}. \tag{3.146}$$

Budući da je za početak posmatranja, $t=0$, izabran trenutak ponovnog paljenja luka, kada napon mreže dostiže svoj minimum (sl. 3.27), ugao φ imaće vrednost

$$\varphi=\pi. \tag{3.147}$$

S obzirom da je obično

$$\frac{\omega}{\omega_1}\ll 1. \tag{3.148}$$

iz (3.144) može se bez unošenja većih grešaka izostaviti član sa pomenutim parametrom.

Maksimalna apsolutna vrednost napona u_2 postići će se u trenutku t_1

$$t_1=\frac{\pi}{\omega_1}, \tag{3.149}$$

što se lako zaključuje iz (3.144), kada se ima u vidu (3.147) i (3.148).

Tada će biti

$$u_m=|u_2(t_1)|=\left|\sqrt{2}\,U_n\cos\frac{\omega}{\omega_1}\pi+(\sqrt{2}\,U_n+u_{20})\,e^{-\delta\frac{\pi}{\omega_1}}\right|. \tag{3.150}$$

S obzirom na (3.147), izrazu (3.150) može se dati oblik

$$u_m=|e_0+K(e_0+u_{20})|. \tag{3.151}$$

U (3.151) e_0 označava napon mreže neposredno pre ponovnog paljenja luka. Takođe je označeno

$$K=e^{-\delta\frac{\pi}{\omega_1}}. \tag{3.152}$$

Ako se zanemari odvođenje zaostalog opterećenja, kao i razlika između e. m. s. mreže i napona u_1 u režimu pre gašenja luka, biće

$$u_{20}\approx\sqrt{2}\,U_n. \tag{3.153}$$

Kada se pored učinjenih zanemarenja izostavi i uticaj prigušenja, tj. usvoji $K\approx 1$, iz (3.151) se dobija

$$u_m=3\sqrt{2}\,U_n. \tag{3.154}$$

S obzirom na učinjena zanemarenja, relacija (3.154) daje gornju granicu mogućih prenapona posle prvog ponovnog paljenja.

Ako se pretpostavi da će prekidač ponovo ugasiti struju pri prvom njenom narednom padu na nultu vrednost, što treba očekivati u stvarnim uslovima, na kapacitetu C_v (vodu) zaostaće ovog puta ceo napon u_m, pošto se ovaj dostiže upravo u trenutku nulte vrednosti struje. Napon u_1 će se posle prigušenog prelaznog procesa ponovo vratiti na vrednost e. m. s. mreže.

Opisana pojava paljenja i gašenja luka može se u principu nastaviti i dalje. Ako do ponovnih paljenja luka u prekidaču dolazi uvek kod ekstremnih vrednosti napona u_1 a do gašenja odmah potom pri prvom padu struje na nultu vrednost, napon na vodu će narastati iz ciklusa u ciklus. Razmatrana pojava, kako se vidi, odvija se prema istom ritmu paljenja i gašenja luka koji pretpostavlja teorija Petersena kod tumačenja intermitentnih prenapona (odeljak 3.4.1).

U stvarnim uslovima porast napona je ograničen postojećim prigušenjima.

Neka je napon na kapacitetu C_v posle n-tog gašenja struje iznosio u_{mn}. U trenutku neposredno pre prvog narednog paljenja luka u prekidaču pomenuti napon će, usled odvoda kroz izolaciju kao i preko eventualnih naponskih transformatora, pasti na vrednost

$$u_{20}=u_{mn}(1-d) \tag{3.155}$$

sa istim značenjem parametara d kao u (3.126).

Saglasno (3.151), (3.153) i (3.155) maksimalni napon na vodu posle $n+1$-og paljenja luka biće

$$u_{mn+1}=\sqrt{2}\,U_n+K[\sqrt{2}\,U_n+u_{mn}(1-d)] \tag{3.156}$$

Ako pretpostavimo da se posle n paljenja luka maksimalni napon ustaljuje, biće

$$u_{mn+1}=u_{mn}. \tag{3.157}$$

Na osnovu (3.157) iz (3.156) se, tako, za maksimalno moguću vrednost prenapona u mreži dobija

$$u_g = u_{mn} = \frac{1+K}{1-K(1-d)}\sqrt{2}\,U_n. \tag{3.158}$$

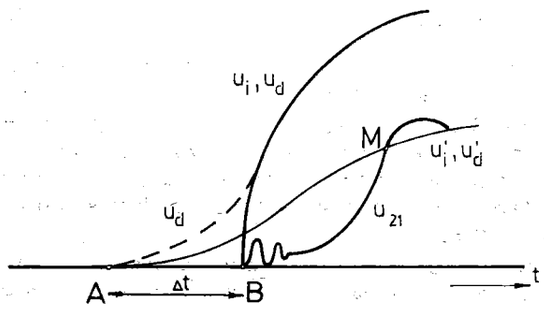
Primera radi, za $K=0{,}8$ i $d=0{,}2$ iz (3.158) se izračunava

$$u_g = 5\sqrt{2}\,U_n. \tag{3.159}$$

Vrednost (3.159) dobijena je za najnepovoljniji ritam paljenja i gašenja luka u prekidaču. Kako su praktična iskustva pokazala [68], prenaponi pri ponovnim probojima u prekidačima u realnim mrežama obično ne prelaze vrednost reda $(3\div3{,}5)\sqrt{2}\,U_n$.

3.5.2. UTICAJ KARAKTERISTIKA PREKIDAČA

Verovatni trenutak ponovnog paljenja luka mnogo zavisi od brzine uspostavljanja dielektrične čvrstoće između kontakata prekidača posle gašenja struje.



Sl. 3.28

Neka je A trenutak kada prekidač počinje da otvara kontakte, a B trenutak dolaska struje na nultu vrednost (sl. 3.28). Isprekidana linija pokazuje kako se uspostavlja »bestrujna« dielektrična čvrstoća u_d između kontakata prekidača. Pod bestrujnom dielektričnom čvrstoćom podrazumevamo maksimalni napon izolovanosti između kontakata prekidača koji bi se imao u određenom trenutku kada kroz prekidač ne bi proticala struja. Kako se sa sl. 3.28 vidi, napon izolovanosti između kontakata, u_i, vrlo brzo dostiže »bestrujnu« dielektričnu čvrstoću i nadalje se sa ovom poklapa.

Vremenski period Δt je slučajna veličina i leži u opsegu

$$0 \leqslant \Delta t < 0{,}01\ (s). \tag{3.160}$$

Do ponovnog paljenja luka doći će ako je u bilo kom trenutku

$$u_{21} \geqslant u_i, \tag{3.161}$$

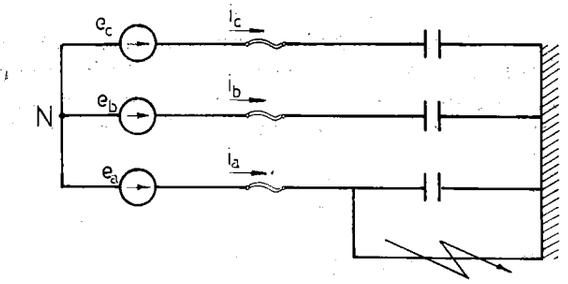
gde smo sa u_{21} označili napon između kontakata prekidača koji se uspostavlja u mreži.

Kako se vidi sa sl. 3.28, kod prekidača sa znatnom dielektričnom čvrstoćom i brzinom uspostavljanja ove čvrstoće, za kakve je slika nacrtana, nikad neće doći do ponovnog paljenja luka kod visokih vrednosti u_{21}. Do ponovnog paljenja može da dođe samo kod malih vrednosti vremenskih razmaka Δt, ali tada kod niskih napona u_{21}, što neće prouzrokovati osetnije prenapone.

Ponovno paljenje kod visokih vrednosti napona u_{21} može se dogoditi kod prekidača koji sporo uspostavljaju dielektričnu čvrstoću tako da im je i kod većih razmaka t kriva u_i odnosno u_d relativno niska i posle gašenja luka. Kriva u_i', u_d' na sl. 3.28 prikazuje karakteristiku jednog takvog prekidača. U tački M došlo bi do ponovnog paljenja luka. Razmatrane, nepovoljne karakteristike mogu da imaju starije konstrukcije prekidača. Smatra se da naročito uspešno kapacitivne struje gase vazdušni prekidači [74].

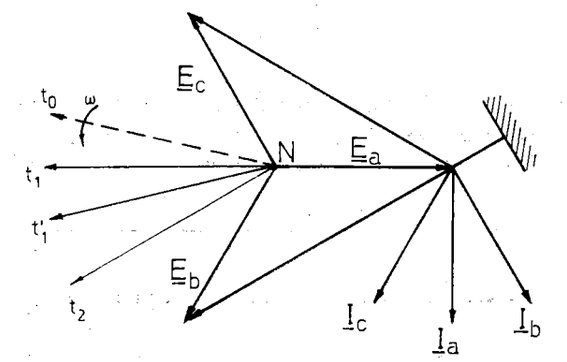
3.5.3. PREKIDANJE STRUJE ZEMLJOSPOJA

Na sl. 3.29 prikazana je uprošćena šema distributivne mreže sa zemljospojem na fazi a. Pretpostavlja se da je mreža neopterećena. Sa e_a, e_b i e_c označene su e. m. s. napojne mreže.



Sl. 3.29

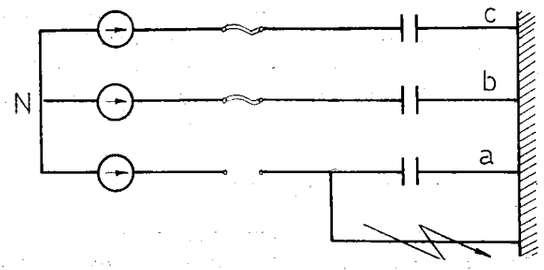
Sl. 3.30 prikazuje fazorski dijagram napona i struja u posmatranim uslovima. Isprekidano izvučena prava linija predstavlja referentnu vremensku osu. Vrednosti veličina mreže u određenom posmatranom trenutku dobijaju se projekcijom fazora na vremensku osu. Na dijagramu je označena referentna tačka nultog potencijala — zemlja.



Sl. 3.30

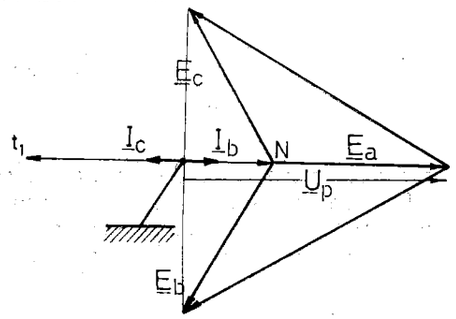
Pretpostavimo da su kontakti prekidača počeli da se razmiču u trenutku t_0 koji prethodi nultoj vrednosti struje zemljospoja, i_a (sl. 3.30). U trenutku t_1 struja i_a dobija nultu vrednost tako da dolazi do isključenja faze a.

Posle prekidanja struje u fazi *a* šema mreže dobija oblik kao na sl. 3.31.



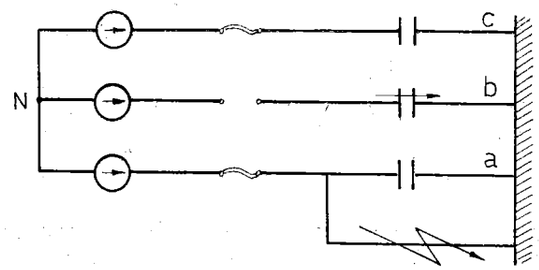
Sl. 3.31

Pošto je faza »*a*« odvojena od zemlje, u mreži se uspostavlja fazorski dijagram napona i struja prikazan na sl. 3.32. Kako se vidi, između kontakata prekidača u fazi »*a*« pojavljuje se povratni napon $u_p = 1{,}5\sqrt{2}\,U_{nf}$ koji će odmah, u trenutku t_1' (sl. 3.30), dovesti do ponovnog paljenja luka, tako da će se mreža vratiti u situaciju sa sl. 3.29 i sl. 3.30.



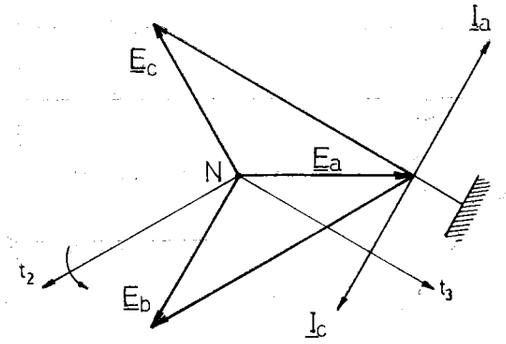
Sl. 3.32

U trenutku t_2 (sl. 3.30) dolazi do gašenja struje u fazi »*b*«. Faza »*b*« voda ostaje opterećena sa naponom $\sqrt{3}\sqrt{2}\,U_{nf}$. Šema mreže i fazorski dijagram napona i struja posle prekidanja struje i_b prikazani su na sl. 3.33 i sl. 3.34.



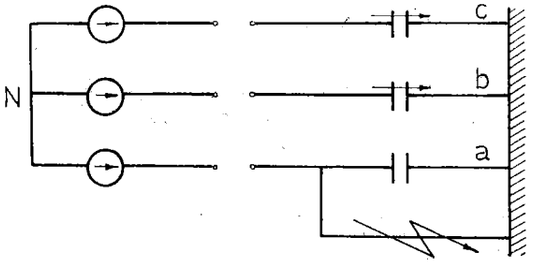
Sl. 3.33

Kako se vidi sa sl. 3.34, struje i_c i i_a dobijaju svoje nulte vrednosti jednovremeno, u trenutku t_3. Posle gašenja ovih struja izvor napajanja odvojen je potpuno



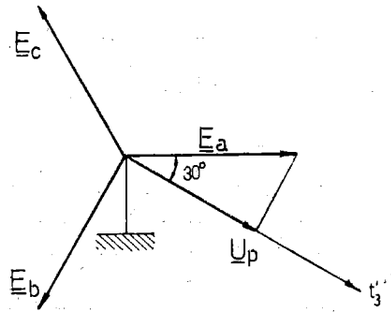
Sl. 3.34

od vodova (sl. 3.35). Iz fazorskog dijagrama na sl. 3.36 vidi se, međutim, da se, pošto neutralna tačka dolazi na nulti potencijal, između kontakata prekidača u



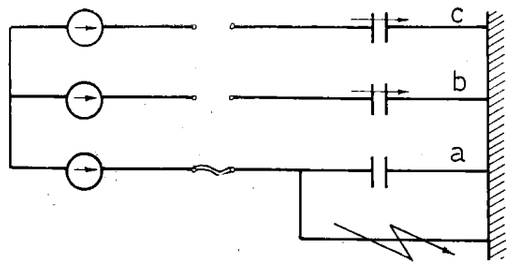
Sl. 3.35

fazi »*a*« uspostavlja povratni napon $u_p = \frac{\sqrt{3}}{2}\sqrt{2}\,U_{nf}$, koji će odmah, u trenutku t_3' neposredno posle t_3, dovesti do ponovnog paljenja luka u pomenutoj fazi.



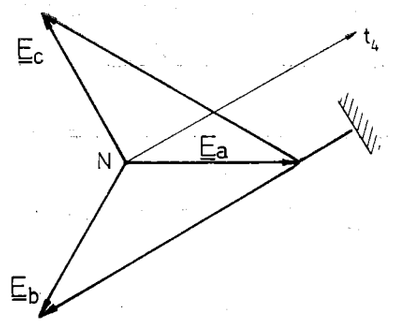
Sl. 3.36

Šema mreže i fazorski dijagram posle trenptka t_3' prikazani su na sl. 3.37 i sl. 3.38.



Sl. 3.37

Do ponovnog paljenja luka na kontaktima prekidača u fazi »*b*«, u najnepovoljnijem slučaju, doći će u trenutku t_4 kada napon faze »*b*« prema zemlji dostigne svoju maksimalnu negativnu vrednost (sl. 3.38).



Sl. 3.38

Na fazi »*b*« pojavio bi se tada prenapon, saglasno (3.151)

$$u_m = \sqrt{3}\sqrt{2}\,U_{nf} + K\left[\sqrt{3}\sqrt{2}\,U_{nf} + \sqrt{3}\sqrt{2}\,U_{nf}(1-d)\right] =$$

$$= \sqrt{3}\left[1 + K + K(1-d)\right]\sqrt{2}\,U_{nf}. \qquad (3.162)$$

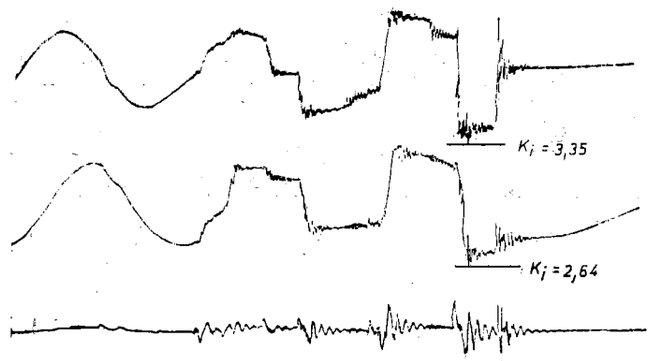
Za $K=0{,}8$ i $d=0{,}2$ iz (3.162) se izračunava:

$$u_m = 4{,}23\sqrt{2}\,U_{nf},$$

što predstavlja ozbiljan prenapon za mrežu. Ovaj bi prenapon verovatno doveo do kvara izolacije ili reagovanja odvodnika prenapona, ako ovi postoje.

Na sl. 3.39 prikazani su oscilogrami napona faza voda pri isključivanju zemljospoja dobijeni merenjima u jednoj mreži 35 kV sa izolovanom neutralnom tačkom [70]. Vod u kvaru se isključivao hidromatskim prekidačem. Gornja dva oscilograma odnose se na ispravne faze, a donji na fazu u kvaru.

Zaravnjeni delovi oscilograma napona ispravnih faza, predstavljaju razmake između gašenja i ponovnog paljenja luka. Kako se vidi, prenaponi na vodu postepeno rastu dostižući vrednosti $3{,}35\sqrt{2}\,U_{nf}$.



Sl. 3.39

Kako se iz naših razmatranja može zaključiti, prenaponi pri isključenju jednofaznog zemljospoja uzrokovani su prvenstveno nepovoljnim karakteristikama prekidača. Iako su kod izolovanih mreža pomenuti prenaponi nešto većih vrednosti, oni se mogu pojaviti čak i kada je mreža uzemljena preko male otpornosti, kako su pokazali pojedini eksperimenti [70]. Do prenapona razmatrane vrste može inače doći i pri isključivanju slabo opterećenih vodova i kada u mreži nema zemljospoja.

Iz navedenog proizilazi da se prenaponi pri isključivanju jednofaznih zemljospojeva mogu izbeći primenom savremenih prekidača i njihovim pravilnim održavanjem. Razmatrane pojave nisu bitno uslovljene načinom uzemljenja neutralne tačke. One ne ograničavaju oblast primene izolovane neutralne tačke, niti osetnije utiču na izbor načina uzemljenja.

3.6. UGROŽENOST MREŽA OD PRENAPONA

3.6.1. OCENA VISINE PRENAPONA I IZDRŽLJIVOSTI IZOLACIJE

Iz izlaganja u odeljcima 3.2 do 3.5 vidi se da kod mreža sa izolovanom neutralnom tačkom mogu da se u određenim uslovima pojave prelazni prenaponi nekoliko puta veći od normalnih radnih napona. Pri jednofaznim zemljospojevima dolazi takođe i do trajnijih, stacionarnih prenapona na ispravnim fazama. Da li će pomenute pojave da dovedu do drugih kvarova u mreži ili, tačnije, koliko često će do ovakvih kvarova dolaziti, zavisi od izolacionog stupnja mreže, karakteristika prenaponske zaštite, kvaliteta montaže i održavanja, trajanje pogona sa zemljospojem, načina otkrivanja zemljospojeva i drugih kvarova i dr.

U Tabeli 3.2 dati su, primera radi, izolacioni stupnjevi mreža u Jugoslaviji prema standardima JUS N.B0.030 iz 1970. god., na osnovu kojih je izgrađen znatan deo postojećih mreža.

TABELA 3.2

Stupanj izolacije	Najviši pogonski napon kV	Jednominutni podnosivi naponi industrijske frekvencije prema zemlji kV		Podnosivi udarni naponi standardnog talasa pozit. i negat. polariteta kV	
		stupanj izolacije		stupanj izolacije	
		pun	snižen	pun	snižen
Si 3,6	3,6	16		45	
Si 3,6 a	3,6	21		45	
Si 7,2	7,2	22		60	
Si 7,2 a	7,2	27		60	
Si 12	12	28		75	
Si 12 a	12	35		75	
Si 24	24	50		125	
Si 24 a	24	55		125	
Si 38	38	70		170	
Si 38 a	38	75		170	
Si 123	123	230		550	
Si 123 a	123		185		450
Si 245	245	460		1050	
Si 245 s_1	245		395		900
Si 245 s_2	245		360		825
Si 245 s_3	245		325		750
Si 420 s_1	420	—	740	—	1675
Si 420 s_2	420	—	680	—	1550
Si 420 s_3	420	—	630	—	1425
Si 420 s_4	420	—	570	—	1300

Kako se vidi iz tabele 3.2, izdržljivost opreme u odnosu na unutarnje prenapone se normira preko jednominutnog podnosivog napona industrijske učestanosti (50 Hz) prema zemlji. Ovaj napon, budući da je mnogo niže učestanosti od prolaznih komponenti unutarnjih prenapona koje su proučavane u prethodnim odeljcima, predstavlja samo dosta grubu, orijentacionu granicu dozvoljenih prenapona i to nejednako valjanu za različitu vrstu opreme. Treba, naime, imati u vidu da su razne izolacione konstrukcije nejednako osetljive na brzinu promene i dužinu trajanja prenapona. Ipak se, međutim, pošto ispitni naponi prema propisima traju neuporedivo duže nego razmatrani prenaponi u mreži, može smatrati da vrednosti iz tabele 3.2 predstavljaju donje, sigurne granice za opremu u odnosu na pomenute prenapone.

Kako se vidi, za mreže 3 do 110 kV zaključno, predviđeni su stupnjevi izolacije sa povišenim jednominutnim ispitnim naponom označeni indeksom »*a*«. Mreže 3 do 35 kV izvode se po pravilu za pun stupanj izolacije, budući da se ovde

predviđa rad sa neefikasno uzemljenom neutralnom tačkom (tačka 1.1.3). Kod mreža 110 kV mogu se primeniti oba stupnja izolacije.

Pošto za distributivne mreže dolaze za sada u obzir naponi do 35 kV i eventualno 110 kV, to će se dalja razmatranja ograničiti samo na ove napone.

Na osnovu podataka iz tabele 3.2 može se odrediti dozvoljeni faktor prenapona za mrežu kod unutarnjih prenapona

$$k = \frac{U_i}{U_f}. \tag{3.163}$$

U (3.163) smo sa U_i označili ispitni jednominutni napon a sa U_f napon mreže.

Vrednost faktora k za mreže različitih nazivnih napona date su u tabeli 3.3. Faktori prenapona računati su u odnosu na nazivni i maksimalni pogonski fazni napon mreže.

TABELA 3.3

U_n, kV	$\frac{U_i}{U_{nf}}$	$\frac{U_i}{U_{mf}}$
3	9,25	7,69
6	6,34	5,29
10	4,85	4,04
20	4,34	3,61
35	3,46	3,20
110	3,62	3,24

Podaci se odnose na pun stupanj izolacije.

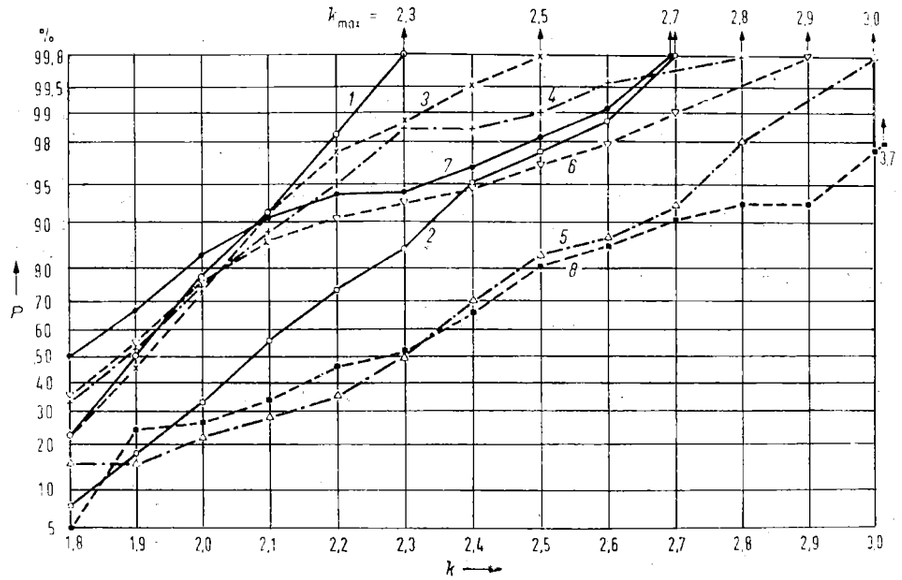
U pogonskim uslovima dolazi do postepenog starenja i zaprljanja izolacije tako da ova nema istu dielektričnu čvrstoću kao nova, neposredno posle fabrikacije. Zato stvarni podnosivi ispitni naponi različite opreme mogu da budu nešto niži od normiranih napona pa, prema tome, i odgovarajući dopustivi faktori prenapona.

Dobar sud o izdržljivosti mreže u eksploataciji može se dobiti analizom podataka iz eksperimenata sa zemljospojevima ili iz normalnog rada mreže, praćenog preko uređaja za automatsko osciloskopsko beleženje pojava. Posebno dragoceni su podaci iz pogona mreže pošto daju vernu sliku o prenaponskim pojavama u stvarnim uslovima. Kod eksperimentalnih analiza sa veštački izazvanim zemljospojevima uslovi na mestu kvara samo približno odražavaju realne prilike i mogu da u izvesnoj meri izmene tok razmatranih pojava.

Vrlo interesantni u gore pomenutom smislu su podaci o prenaponima u četiri mreže 110 kV i jednoj mreži 20 kV u SR Nemačkoj, zabeleženi pisačima sa magnetnim trakama u periodu 1957—1965. godine [14]. Sve mreže su radile sa kompenzacijom struje zemljospoja.

Budući da kompenzacione prigušnice kao elementi sa velikom induktivnošću nebitno utiču na pojave viših učestanosti, kakve se imaju pri nastanku jednofaznih zemljospojeva, podaci u pogledu prenapona kod nastanka zemljospojeva za ovakve mreže važe praktično i za izolovane mreže sličnih karakteristika.

Na sl. 3.40 prikazani su statistički obrađeni podaci o ustanovljenim faktorima prenapona. Na ordinatnoj osi date su relativne učestanosti zemljospojeva, a na apscisnoj osi, faktori prenapona.



Sl. 3.40

Veličina P, relativna učestanost, predstavlja broj jednofaznih zemljospojeva kod kojih faktori prenapona nisu prevazilazili određene vrednosti prema apscisi dijagrama, sveden na ukupan broj registrovanih kvarova. Pomenuta veličina može se smatrati empirijskom kumulativnom verovatnoćom odgovarajućeg događaja.

Krive 1 do 6 odnose se na različite mreže 110 kV. Kriva 7 daje rezultate merenja u mreži 20 kV kod jednofaznih zemljospojeva, a kriva 8 u istoj mreži, kod naknadnih kvarova.

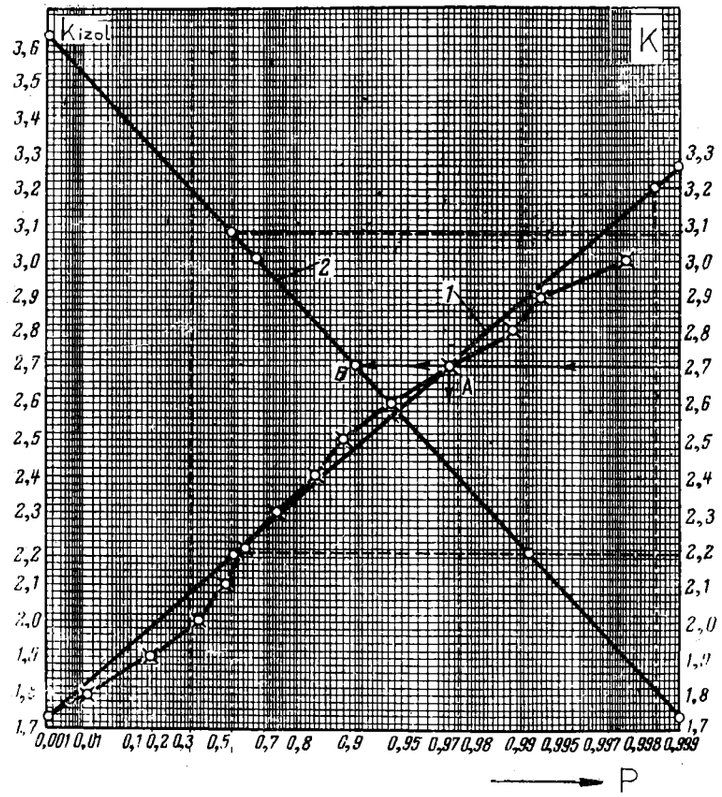
U mrežama 110 kV je u navedenom periodu zabeleženo ukupno 714 zemljospojeva sa maksimalnim faktorom prenapona do 3, kako se vidi sa sl. 3.40. Prenaponi nisu ni u jednom slučaju doveli do oštećenja izolacije na nekom drugom mestu u mreži.

U mreži 20 kV zabeleženo je 121 jednofaznih zemljospojeva sa maksimalnim faktorom prenapona do 3. U 41 slučajeva došlo je do naknadnih pojava u mreži. Pomenuti kvarovi, međutim, bili su, kako se procenjuje, najverovatnije prouzrokovani delovanjem cevnih odvodnika prenapona kojima je vremenom opao naizmenični napon reagovanja. U pojedinim slučajevima dolazilo je do delovanja odvodnika već kod napona $1{,}7\sqrt{2}\,U_{nf}$, kao i do višestrukog uzastopnog reagovanja odvodnika u različitim fazama što je dovodilo do znatnih prenapona, a u 5 slučajeva i do dvostrukih zemljospojeva. Faktori prenapona pri opisanim naknadnim kvarovima dosezali su vrednosti do 2,9, a jednom prilikom čak 3,7. Samo u jednom slučaju naknadni zemljospoj ispravne faze bio je prouzrokovan preskokom na izolaciji, a u svim ostalim, delovanjem odvodnika. U pomenutom slučaju do preskoka je

došlo 1,4 s posle prvog zemljospoja, pri normalnom složenom naponu. Budući da je razmatrana faza u toku prvog zemljospoja bila izložena prenaponu od samo $2{,}2\sqrt{2}\,U_{nf}$, očigledno se radilo o mestu sa od ranije oštećenom izolacijom.

Takođe se pokazalo da je izolacija mreže osetljiva na trajnije ili višestruko ponovljene prenapone, do kakvih dolazi kod nestabilnih zemljospojeva koji se više puta gase i uspostavljaju. U ovakvim uslovima dolazilo je do kvara izolacije ispravnih faza i kod faktora prenapona reda 2,5.

Na sl. 3.41 dat je dijagram koji prikazuje verovatnoću pojave određenih faktora prenapona (prava 1) kao i verovatnoću kvara izolacije zavisno od faktora prenapona (prava 2). Dijagram je dobijen obradom 612 eksperimenata sa zemljospojem u pojedinim mrežama 35 kV u SSSR [17]. Mreže su bile izolovane ili kompenzovane, kablovske, vazdušne i mešovite.



Sl. 3.41

U odnosu na pravu 1 vrednosti na apscisnoj osi predstavljaju empirijsku (kumulativnu) verovatnoću da faktor prenapona pri jednofaznom zemljospoju neće biti veći od vrednosti na ordinati. Pravom 1 aproksimirana je sa minimalnom kvadratnom greškom prikazana eksperimentalna kriva.

U odnosu na pravu 2, vrednosti na apscisnoj osi dijagrama predstavljaju empirijsku (kumulativnu) verovatnoću da će izolacija mreže podneti prenapone sa faktorima ne većim od vrednosti datih na ordinati.

Sa dijagrama se vidi da verovatnoća da će faktor prenapona biti viši od 3,2 iznosi svega 0,0015, a od 2,7 svega 0,025 (tačka A). Srednja vrednost faktora prenapona (ovaj odgovara verovatnoći 0,5) iznosila je u eksperimentima 2,19. Verovatnoća da će izolacija mreže podneti pomenuti prenapon jednaka je 0,992, znači vrlo je velika. Takođe se pokazuje da bi kod prenapona sa faktorom do 2,7 trebalo računati sa jednim naknadnim kvarom na svakih 10 jednofaznih zemljospojeva budući da verovatnoća kvara izolacije iznosi 0,9 (tačka B). Pošto do kvarova ispravnih faza na istom mestu često dolazi i zbog proširenja električnog luka ili njegovih toplotnih uticaja, to je verovatnoća kvara izolacije isključivo usled prenapona još manja.

Prema podacima dobijenim u distribuciji Moskve, u 10 kV mreži koja radi kompenzovana i manjim delom izolovana, dvostruki zemljospojevi vrlo su retki. Na 1000 km mreže u 10 godina ima se u proseku samo jedan dvostruki zemljospoj. To znači da pomenuta mreža dobro podnosi sve prenapone kod zemljospojeva, za koje se smatra da iznose do reda $2{,}6 \div 2{,}8 \sqrt{2}\, U_{nf}$. Navedeni podatak je interesantan zbog toga što je deo mreže 10 kV Moskve izveden sa kablovima IPO 13 jugoslovenske proizvodnje.

Kod eksperimenata sa zemljospojem izvedenih na mreži 35 kV u Istri [70] dolazilo je, kako smo naveli u 3.5, do ponovnih proboja u prekidaču pri isključenju kvara, koji su dovodili i do prenapona reda $3{,}4 \div 3{,}5 \sqrt{2}\, U_{nf}$ u nekoliko slučajeva. Izolacija mreže, koja je sadržala i vazdušne i kablovske vodove, dobro je podnela navedene prenapone i samo je u jednom slučaju došlo do naknadnog kvara na jednom kablu.

Izolacioni nivo mreže, naročito ako je ova jednim delom vazdušna, može da bude znatno snižen zaprljanjem usled polucije od raznih industrijskih objekata, kada do kvara na izolaciji, obično preskoka preko izolatora, ponekad dolazi i kod prenapona ne većih od $2{,}4 \sqrt{2}\, U_{nf}$. Ovo su, međutim, specifični slučajevi.

Iz prethodnog se zaključuje da izolacija mreže, izabrana prema jednominutnim ispitnim naponima, dobro podnosi prenapone pri zemljospoju koji se mogu očekivati u uobičajenim uslovima, gde su oni do reda $3 \sqrt{2}\, U_f$. Verovatnoća pojave dvostrukih zemljospojeva povećava se kod trajnijih i višestruko ponovljenih prenapona, kakvi se mogu uspostaviti kod isključivanja zemljospojeva prekidačima sklonim ponovnim probojima i kod nepostojanih zemljospojeva. Nepostojani zemljospojevi intermitentnog tipa retki su u javnim distributivnim mrežama (odeljak 3.4.3). Kod izolovanih mreža su takođe retki i nepostojani zemljospojevi sa sporim ritmom ponovnih nastanaka, pošto se kod ovakvih mreža naglo uspostavlja povratni napon na neispravnoj fazi koji, ako se izolacija na oštećenom mestu nije obnovila, odmah dovodi do ponovnog kvara.

3.6.2. IZBOR VENTILNIH ODVODNIKA PRENAPONA

Pri izboru ventilnih odvodnika prenapona treba voditi računa o naponu gašenja. Pod naponom gašenja odvodnika podrazumeva se, kao što je poznato, minimalna efektivna vrednost naizmeničnog napona učestanosti 50 Hz pri kojoj sigurno dolazi do gašenja propratne struje 50 Hz koja protiče kroz odvodnik posle njegovog reagovanja. Po JUS standardima, saglasno preporukama IEC, napon

gašenja smatra se nazivnim naponom odvodnika. Odvodnik treba izabrati tako da sigurno dođe do gašenja popratne struje pri svim uslovima u mreži, kako ova ne bi dovela do toplotnog razaranja odvodnika.

Da bi navedeni uslov bio ispunjen, nazivni napon odvodnika treba da bude viši od najvećih napona 50 Hz koji se mogu uspostaviti u mreži između faza i zemlje. Kritični u pomenutom smislu su po pravilu jednofazni zemljospojevi kod kojih se na ispravnim fazama uspostavljaju stacionarni prenaponi jednaki međufaznom radnom naponu (odeljak 3.1).

Da bi sigurno došlo do gašenja propratne struje kroz odvodnik i u pomenutim, kritičnim okolnostima, trebalo bi da bude zadovoljen uslov

$$U_{n0} \geqslant 1{,}1\, U_{r\,\max}, \tag{3.164}$$

gde smo sa U_{n0} označili nazivni napon odvodnika a sa $U_{r\ \max}$ maksimalni dozvoljeni radni napon mreže prema tabeli 3.2. Koeficijentom 1.1 obuhvata se dodatno moguće povećanje napona ispravnih faza pri jednofaznom zemljospoju usled neidealne simetrije mreže (Poglavlje 2). Prema IEC preporukama i jugoslovenskim propisima nazivni napon odvodnika za izolovane mreže bira se prema relaciji (3.164) bez koeficijenta povećanja, tako da ovaj može biti jednak maksimalnom radnom naponu mreže. Uslova (3.164) trebalo bi se držati kod vazdušnih mreža koje imaju duge netransponovane vodove.

Druga karakteristična veličina ventilnog odvodnika u pogledu unutarnjih prenapona u mreži je minimalni naizmenični napon reagovanja, 50 Hz. Ovaj napon približno pokazuje pri kojim vrednostima unutarnjih prenapona može doći do reagovanja odvodnika. Tabela 3.4 navodi podatke o minimalnom naizmeničnom

TABELA 3.4

Tip odvodnika	Minimalni naizmenični napon reagovanja U_{rg} kV	$\frac{U_{rg}}{U_f}$
VOP — 12	21	3,03
VOP — 15	23	3,32
VOP — 25,5	47	3,39
VOP — 40,5	75	3,41
VOP — 42	78	3,55
KOA — 15	25	3,61
KOA — 25	42	3,03
KOA — 40	68	3,1

naponu reagovanja, U_{rg}, za pojedine odvodnike prenapona proizvodnje »Minel«. Odvodnici VOP su za nazivnu struju 10 kA, a odvodnici KOA, za 5 kA. Brojka u oznaci tipa predstavlja nazivni napon odvodnika u kV, odnosno napon gašenja. U poslednjoj koloni tabele su navedeni faktori prenapona u mreži pri kojima se dostiže napon reagovanja odvodnika. Faktori prenapona su računati u odnosu na maksimalni radni fazni napon.

Propusna sposobnost odvodnika u pogledu komutacionih prenapona prema jugoslovenskim propisima, saglasno preporukama IEC, određuje se dugim »pravougaonim« ispitnim strujnim talasima koje odvodnik treba bez oštećenja da podnese 20 puta uzastopno. Normirane vrednosti ispitnih strujnih talasa za odvodnike različitih nazivnih struja navedene su u tabeli 3.5.

TABELA 3.5

nazivna struja odvodnika i_{n0} kA	amplituda ispitnog strujnog talasa i_m A	dužina talasa Δt μs
10	150	2 000
5	75	1 000
2,5	50	500
1,5	ispitivanja nisu predviđena	ispitivanja nisu predviđena

Iz datih podataka može se proceniti energija koju je odvodnik u stanju da apsorbuje ako reaguje na unutarnji prenapon.

Zavisnost napon — struja odvodnika može se približno opisati izrazom [15, 71]

$$u = Ai^{a}. \tag{3.165}$$

Relacija (3.165) odnosi se na maksimalne vrednosti napona i struja. Eksponent »a« obično ima vrednost iz opsega $0{,}1 \div 0{,}3$.

Konstanta A može se približno odrediti iz napona gašenja odnosno nazivnog napona odvodnika i propratne struje I_p pri ovom naponu

$$A = \frac{\sqrt{2}\,U_{n0}}{(\sqrt{2}\,I_p)^{a}}. \tag{3.166}$$

S obzirom na (3.166), izrazu (3.165) može se dati oblik

$$u = \sqrt{2}\,U_{n0}\left(\frac{i}{\sqrt{2}\,I_p}\right)^{a}. \tag{3.167}$$

Energija koju apsorbuje odvodnik pri svakom odvođenju ispitnog strujnog talasa jednaka je

$$W = \int_0^{\Delta t} uidt = u\,i\,\Delta t. \tag{3.168}$$

Kada se »u« prema (3.167) uvrsti u (3.168), dobija se posle sređivanja,

$$W = 2\,U_{n0}\cdot I_p\left(\frac{i}{\sqrt{2}\,I_p}\right)^{1+a}\Delta t. \tag{3.169}$$

Primera radi, za odvodnik prenapona za mreže 35 kV sa $U_{n0}=42$ kV, $i_{n0}=10$ kA, $\sqrt{2}\,I_p=50$ A i $a=0{,}2$ biće, za strujni talas prema tabeli 3.5,

$$W = 2\cdot 42\,000\,\frac{50}{\sqrt{2}}\left(\frac{150}{50}\right)^{1{,}2}\cdot 2\,000\cdot 10^{-6} = 20{,}2\text{ kJ}. \tag{3.170}$$

Kada kod jednofaznog zemljospoja reaguje odvodnik na jednoj od ispravnih faza, on apsorbuje praktično svu energiju kojom se usled kvara opterećuju ispravne faze. Ako pretpostavimo da je do kvara došlo u trenutku kada je napon pogođene faze imao svoju maksimalnu vrednost $\sqrt{2}\,U_{rf}$, neutralna tačka napojnog transformatora dobija prema zemlji napon $-\sqrt{2}\,U_{rf}$ kojim opterećuje nulte kapacitete ispravnih faza. Energija kojom se opterećuju pomenute faze biće

$$W_0 = 2\,\frac{C_0\,(\sqrt{2}\,U_{rf})^2}{2} = \sqrt{2}\,C_0\,U_{rf}^2. \tag{3.171}$$

Ako u (3.171) kapacitet C_0 izrazimo preko kapacitivne struje zemljospoja saglasno (3.7), imaće se

$$W_0 = \frac{2}{3\,\omega}\,U_{rf}\,I_c = 2{,}12\cdot 10^{-3}\,U_{rf}\,I_c. \tag{3.172}$$

Za mreže 35 kV, na primer, formula (3.172), računato sa $U_{rf}=38/\sqrt{3}$ kV, daje vrednost

$$W_0 = 46{,}5\,I_z. \tag{3.173}$$

Energija (3.173) biće veća od propusne moći odvodnika W prema (3.170) ako je struja zemljospoja mreže viša od 434 A. Navedena vrednost struje dostiže se u mrežama sa troolovnim papirnim kablovima IPZO-tipa, na primer, kod ukupnih dužina vodova reda 40 km.

Ako imamo u vidu da je, u skladu sa tabelom 3.5 i (3.169) propusna moć odvodnika prenapona nazivne struje 5 kA oko četiri puta manja od moći odvodnika za 10 kA, kritične vrednosti struja zemljospoja kod ovih odvodnika iznosila bi oko 100 A. Ovo je vrednost koja se često prevazilazi u kablovskim distributivnim mrežama.

Pošto odnos W/W_0 ne zavisi bitno od nazivnog napona mreže, kako se može videti iz (3.169) i (3.172), vrednosti graničnih struja, procenjene u razmatranom primeru, važe približno za mreže svih naponskih nivoa.

Izvedena orijentaciona analiza pokazala je da reagovanje odvodnika kod jednofaznih zemljospojeva, iako je ono za odvodnike 10 kA obično u granicama propusne moći, nije poželjno, naročito ako bi isto bilo često i sa višestrukim uzastopnim ponavljanjem.

Slične se okolnosti imaju i kod prenapona nastalih pri komutacijama u mreži sa ili bez zemljospoja.

Iz tabele 3.5 se vidi da su naponi reagovanja odvodnika, ako su odvodnici izabrani saglasno (3.164), dosta viši od realno očekivanih prenapona pri zemljospojevima. I u slučajevima kada opadne zbog zaprljanosti ili starenja, napon reagovanja ima i dalje znatne vrednosti tako da i ako dođe do reagovanja odvodnika,

ona će biti vrlo retka, zbog male verovatnoće pojave izuzetno visokih prenapona (tačka 3.6.1). Kod mreža sa znatnim strujama jednofaznih zemljospojeva moglo bi pri tom da dođe i do razaranja odvodnika, naročito ako su ovi manje propusne moći. Razmatrani slučajevi mogu se imati u prostranim mešovitim mrežama viših nazivnih napona. Oni, međutim, nisu česti i lako se izbegavaju pravilnim izborom odvodnika.

3.7. TOPLOTNI UTICAJI STRUJE JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA

3.7.1. PRELAZAK ZEMLJOSPOJA U MEĐUFAZNI KRATKI SPOJ

Uslovi prelaska zemljospoja u neki složeniji kvar na istom mestu određeni su u najvećoj meri vrednošću struje zemljospoja. Od ove zavise dimenzije električnog luka kada se luk uspostavlja na otvorenom, a takođe i toplotni uticaji na izolaciju susednih faza kod zatvorenih izolacionih konstrukcija, kakve se imaju kod kablova i kablovske opreme, mernih i energetskih transformatora i drugih aparata.

U sovjetskim propisima rad sa izolovanom neutralnom tačkom napušta se kada struje jednofaznog zemljospoja pređu određene granične vrednosti počev od kojih se može očekivati prelazak jednofaznog zemljospoja u složeniji kvar. Pomenute granične vrednosti struja navedene su u tabeli 3.6 [23, 74].

TABELA 3.6

Nazivni napon mreže kV	6	10	15—20	35
Granična struja A	30	20	15	10

Isti kriterijum za napuštanje pogona sa izolovanom neutralnom tačkom usvojili su i jugoslovenski propisi.

Pojedini eksperimenti izvedeni u javnim distributivnim mrežama [17] pokazali su da se jednofazni zemljospoj može, kod mreža 6 i 10 kV, razviti u složeniji kvar i pri strujama oko 1,5 puta manjih vrednosti od datih u tabeli 3.6.

Izneti podaci su, kako se vidi, u osetnoj nesaglasnosti sa eksperimentalnim rezultatima o strujama samogašenja, navedenim u tački 3.2.4, kao i dijagramima na sl. 3.12. Prema pomenutim dijagramima, zasnovanim takođe na eksperimentalnim podacima, kod struja do reda 50÷60 A, znači znatno većih od vrednosti iz tabele 3.6, može se očekivati samogašenje zemljospojeva, tako da je prelazak u složeniji kvar malo verovatan. Mnoga druga pogonska iskustva, od kojih neka i u SSSR-u, navode na zaključak da dijagrami na sl. 3. 12 ipak bolje odražavaju stvarne uslove u mrežama. Vrednosti iz tabele 3.6, može se smatrati, dobro određuju samo donje granične vrednosti struja jednofaznih zemljospojeva pri kojima uopšte može da dođe do prelaska u višefazni kvar, ali je verovatnoća ove pojave kod navedenih struja ipak dosta mala.

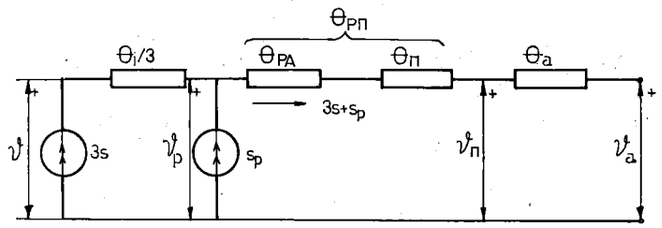
3.7.2. ZAGREVANJE KABLA U RADU SA ZEMLJOSPOJEM

U radu sa jednofaznim zemljospojem znatan deo struje protiče kroz plašt kabla naročito ako kabl ima čeličnu mehaničku zaštitu (tačka 5.6.3). Ovaj dodatni izvor toplote prouzrokuje porast temperature svih slojeva kabla koji se superponira na postojeće radne temperature. Da ne bi došlo do prekoračenja trajno dozvoljenih temperatura izolacije, kabl se u radu sa zemljospojem ne može opteretiti do svoje pune normalne struje.

Pri radu sa jednofaznim zemljospojem remeti se simetrija struja i električnog polja što dovodi do izvesne neravnomernosti zagrevanja faze u kvaru i ispravnih faza. Pošto su dielektrični gubici za naponske nivoe do 35 kV, koji su osnovni predmet naših razmatranja, znatno manji od toplotnih gubitaka u faznim provodnicima, mogu se zanemariti u daljim analizama. Isto se tako u orijentacionim procenama ne mora uvažiti ni neravnomerno strujno opterećenje provodnika ako se ima u vidu da struja zemljospoja koja se superponira na radnu struju pogođene faze znatno fazno prednjači pomenutoj struji tako da se sa ovom ne sabira aritmetički.

U čeličnoj armaturi kabla, ako ova postoji, takođe dolazi do povećanih gubitaka u radu sa zemljospojem, usled vrtložnih struja i histerezisa pod uticajem povećanog magnetnog polja. U približnim procenama zagrevanja kabla i ovi se gubici mogu zanemariti.

Ekvivalentna električna šema za toplotni proračun kabla u zemljospoju, uz učinjene pretpostavke, prikazana je na sl. 3.42. Razmatra se trofazni armirani kabl sa zajedničkim metalnim plaštom, na primer tipa IPO 13.



Sl. 3.42

Na sl. 3.42 je označeno

ϑ — temperatura provodnika,

ϑ_P — temperatura plašta,

$\vartheta_П$ — temperatura na spoljnjem obimu kabla,

ϑ_a — temperatura ambijenta u koji je kabl položen,

θ_i — toplotni otpor izolacije između faznog provodnika i plašta na jedinici dužine kabla,

θ_{PA} — toplotni otpor sloja između plašta i armature na jedinici dužine kabla,

$\theta_П$ — toplotni otpor sloja preko armature na jedinici dužine kabla,

θ_a — toplotni otpor sredine u koju je položen kabl na jedinici dužine kabla.

Sa »s« su označeni toplotni gubici snage po provodniku kabla na jedinici dužine

$$s = R_\vartheta \cdot I^2. \qquad (3.173)$$

Ovde je

R_ϑ — električna otpornost faznog provodnika pri temperaturi ϑ, po jedinici dužine kabla,

I — efektivna vrednost fazne radne struje.

Toplotni gubici snage u plaštu na jedinici dužine kabla jednaki su

$$s_p \approx R_p\,[I_z\,(1-r)]^2 \tag{3.174}$$

gde je

R_p — otpornost plašta po jedinici dužine kabla,

I_z — struja jednofaznog zemljospoja

r — redukcioni faktor kabla (Tačka 5.6.3).

Na osnovu šeme na sl. 3.42 može se pisati

$$\vartheta - \vartheta_a = s\,\theta_i + (3\,s + s_p)\,(\theta_{PA} + \theta_\Pi + \theta_a),$$

odakle se sračunava

$$s = \frac{\vartheta - \vartheta_a - \Delta\,\vartheta_z}{\theta_i + 3\,\Sigma\,\theta} \tag{3.175}$$

gde je, radi skraćenog pisanja, označeno

$$\Sigma\,\theta = \theta_{PA} + \theta_\Pi + \theta_a \tag{3.176}$$

i

$$\Delta\,\vartheta_z = s_p\,\Sigma\,\theta. \tag{3.177}$$

Veličina $\Delta\,\vartheta_z$ predstavlja smanjenje raspoloživog temperaturnog pada $\vartheta - \vartheta_a$ usled dodatnog zagrevanja pri zemljospoju.

Dozvoljeno strujno opterećenje kabla pri zemljospoju može se, u skladu sa (3.173) i (3.175), proceniti prema relaciji

$$I_1 = \left[\frac{\vartheta - \vartheta_a - \Delta\,\vartheta_z}{R_\vartheta\,(\theta_i + 3\,\Sigma\,\theta)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.178}$$

u koju za ϑ treba uvrstiti najveću trajno dozvoljenu temperaturu provodnika.

Dozvoljeno strujno opterećenje kabla u normalnom pogonu izračunava se iz šeme na sl. 3.42, u prvoj približnosti, kada se izostavi grana sa gubicima usled struje zemljospoja. Tako se dobija

$$I_n = \left[\frac{\vartheta - \vartheta_a}{R_\vartheta\,(\theta_i + 3\,\Sigma\,\theta)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.179}$$

Na osnovu (3.178) i (3.179) dolazi se do korisne veze

$$I_1 = \left(1 - \frac{\Delta\,\vartheta_z}{\vartheta - \vartheta_a}\right)^{\frac{1}{2}} I_n, \tag{3.180}$$

koja pokazuje kakav odnos postoji između dozvoljene radne struje pri zemljospoju i maksimalne radne struje u normalnim uslovima.

Iz (3.180) može se, obrnuto, odrediti i maksimalna trajno dozvoljena struja jednofaznog zemljospoja kada do kvara dođe pri radnoj struji $I_1 < I_n$.

Prema (3.180) najveći dozvoljeni prirast $\Delta\,\vartheta_z$ u razmatranim uslovima iznosi

$$\Delta\,\vartheta_z = \left[1 - \left(\frac{I_1}{I_n}\right)^2\right](\vartheta - \vartheta_a). \tag{3.181}$$

Dozvoljena struja zemljospoja biće, s obzirom na (3.174). i (3.177),

$$I_z = \frac{1}{1-r}\left\{\frac{\vartheta - \vartheta_a}{R_p\,\Sigma\,\theta}\left[1 - \left(\frac{I_1}{I_n}\right)^2\right]\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{3.182}$$

Toplotni otpori θ_{PA} i θ_Π za kablove sa zajedničkim olovnim plaštom, kakvi su na primer kablovi IPO 13 jugoslovenske proizvodnje, mogu se izračunati preko jednostavne formule [76]

$$\theta_{PA} + \theta_\Pi = \frac{k}{2\,\pi}\ln\frac{r_p + r_s + \delta}{r_p + r_s + \delta}. \tag{3.183}$$

Ovde su

k — specifični toplotni otpor prekrivki preko metalnih plašteva, na primer $k=5$ (°C m/W),

r_p — spoljni poluprečnik olovnog plašta,

r_s — spoljni poluprečnik kabla,

δ — ukupna debljina prekrivki.

Toplotni otpor tla za kablove položene u zemlji, kada se površina tla smatra izotermom sa temperaturom ϑ_a može se izračunati preko izraza [76]

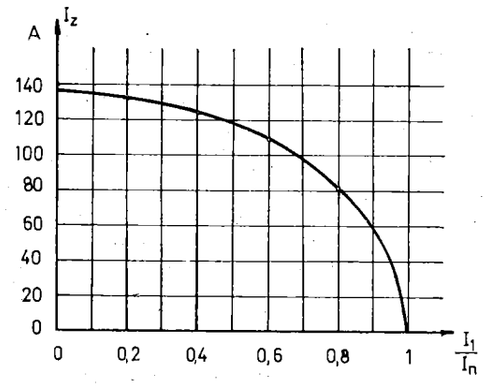
$$\theta_a = \frac{\sigma}{2\,\pi}\ln\frac{2\,h - r_s}{r_s}. \tag{3.184}$$

Ovde smo označili:

σ — specifični toplotni otpor tla

h — dubina polaganja računata do ose kabla.

Specifični toplotni otpor tla kreće se obično u opsegu 0,7÷1,2 °C m/W.



Sl. 3.43

Na sl. 3.43 prikazana je grafička zavisnost (3.182) za jedan kabl 10 kV sa papirnom izolacijom i olovnim omotačem, tipa IPO 13,3×95 mm², jugoslovenske proizvodnje. Dijagram je nacrtan za $k=5$ °C m/W, $\sigma=1$ °C m/W, $h=0{,}7$ m, $\vartheta_a=20$ °C, $\vartheta=60$ °C i $r=0{,}2$. Kako se vidi, pri $I_1/I_n \approx 0{,}7$, koliko se može smatrati da se ima u proseku u toku dnevnih časova, plašt posmatranog kabla mogao bi trajno da podnese

strujno opterećenje reda 100 A. Dobijeni rezultati u dobroj su saglasnosti sa eksperimentima izvedenim na pojedinim uzorcima kablova IPO 13,10 kV.

Izložena analiza, iako orijentacionog karaktera, ukazuje da i dosta dobro opterećeni kablovi mogu da rade trajno sa relativno velikim vrednostima struja jednofaznog zemljospoja. Kolike su te struje zavisi prvenstveno od konstrukcije kabla, tj. od debljine izolacionih slojeva i vrste materijala, načina polaganja kabla i toplotnih karakteristika tla.

3.8. POJAVA DVOSTRUKIH ZEMLJOSPOJEVA

3.8.1. UTICAJI NA MREŽU

Razmatranja u 1.3.2 su pokazala da struje dvostrukih zemljospojeva mogu da imaju vrednosti koje iznose i do reda 80%÷90% vrednosti struja trofaznih kratkih spojeva. Kod mreža sa znatnim strujama trofaznih kratkih spojeva pomenute struje mogu, kada su oba mesta kvara bliska napojnoj *TS*, iznositi i nekoliko kA. Ovoliko velike struje često dovode do pojave opasnih napona na uzemljenjima objekata distributivne mreže, posebno na mestima zemljospoja. Navedena posledica dvostrukih zemljospojeva mora se uzeti u obzir, naročito u mrežama 20 i 10 kV iz kojih se napajaju potrošači na niskom naponu, pošto se opasni potencijali mogu preneti u ovu mrežu.

Struje dvostrukih zemljospojeva toplotno opterećuju uzemljivače i plašteve kablova distributivne mreže.

Dvostruki zemljospojevi mogu indukovati opasne napone u telekomunikacionim vodovima koji se vode paralelno energetskim vodovima.

Pomenuti kvarovi uzrokuju često opasne prenapone koji dovode do daljeg oštećenja ili narušavanja izolacije mreže i do naknadnih višestrukih kvarova.

Može se zaključiti da je pojava dvostrukih zemljospojeva u mrežama nepoželjna zbog više nepovoljnih uticaja ovakvih kvarova, iako se svi ovi ne moraju u svakom određenom slučaju u punoj meri ispoljiti. Pomenuti kvarovi naročito su nepoželjni u gradskim mrežama 20 i 10 kV kod kojih je praktično nemoguće razdvojiti zaštitno uzemljenje TS 20 (10)/0,4 kV od radnog uzemljenja pripadajuće mreže niskog napona.

Iz navedenih razloga, pri izboru načina uzemljenja neutralne tačke distributivne mreže, zaštite i eksploatacione tehnike, treba težiti da se verovatnoća nastanka dvostrukih zemljospojeva svede na najmanju meru. Naredna izlaganja pokušaće da pokažu koje karakteristike mreže prevashodno utiču na pomenutu verovatnoću i koje su granice primene određenih rešenja u mreži sa stanovišta razmatranih kvarova.

3.8.2 VEROVATNOĆA NASTANKA

Verovatnoća nastanka dvostrukog zemljospoja u mreži, uopšte, bez obzira na mesta kvarova, može se izračunati kao

$$P(A)=P(\alpha)\,P(\beta/\alpha) \tag{3.185}$$

U (3.185) je

$P(A)$ — verovatnoća nastanka dvostrukog zemljospoja

$P(\alpha)$ — verovatnoća nastanka jednofaznog zemljospoja na bilo kom mestu mreže,

$P(\beta/\alpha)$— verovatnoća nastanka zemljospoja na jednoj od ispravnih faza posle uspostavljanja jednofaznog zemljospoja,

A — dvostruki zemljospoj,

α — jednofazni zemljospoj,

β — zemljospoj ispravne faze nakon jednofaznog zemljospoja.

Formula (3.185) pretpostavlja da se dvostruki zemljospoj razvija iz jednofaznog, kako je to u stvarnim uslovima po pravilu slučaj.

Verovatnoća da će se mreža u određenom trenutku nalaziti u jednofaznom zemljospoju može se odrediti kao odnos ukupnog trajanja pogona mreže sa zemljospojem u nekom periodu posmatranja i dužine pomenutog perioda

$$P(\alpha)=\frac{\tau_1}{T}. \tag{3.186}$$

Vreme τ_1 izračunava se na osnovu statistički dobijenih podataka o ukupnom broju jednofaznih zemljospojeva u mreži i njihovog prosečnog trajanja

$$\tau_1=\frac{\lambda_1 l}{100}t_1. \tag{3.187}$$

U (3.187) smo označili

λ_1 — broj jednofaznih zemljospojeva u mreži u toku perioda T, sveden na 100 km dužine vodova (1/100 km T),

l — ukupna dužina vodova mreže (km),

t_1 — prosečno trajanje rada sa jednofaznim zemljospojem.

Na osnovu (3.186) i (3.187) se dobija

$$P(\alpha)=\frac{\lambda_1 l}{100}\frac{t_1}{T} \tag{3.188}$$

ili, ako je period posmatranja godina,

$$P(\alpha)=\frac{\lambda_1 l}{100}\frac{t_1}{8760}. \tag{3.189}$$

U relaciji (3.189) vreme t_1 treba uvrstiti u h.

Verovatnoća $P(\beta/\alpha)$ izračunava se, analogno, kao

$$P(\beta/\alpha)=\frac{\lambda_2 l}{100}\frac{t_2}{8760}. \tag{3.190}$$

U (3.190) je

λ_2 — broj zemljospojeva ispravnih faza koji bi nastali kada bi mreža u periodu T radila sa jednofaznim zemljospojem, sveden na 100 km dužine vodova (1/100 km T),

t_2 — vreme trajanja dvostrukog zemljospoja (h).

Parametar λ_2 ima veću vrednost od λ_1 zbog povećanih radnih napona ispravnih faza prema zemlji u režimu sa jednofaznim zemljospojem. Orijentaciono se može uzeti

$$\lambda_2 = \nu\lambda_1, \quad \nu \geqslant 1. \tag{3.191}$$

Sačinilac ν blizak je jedinici kod mreža sa znatnom izolacionom rezervom prema zemlji. U takve, na primer spadaju vazdušne mreže sa drvenim stubovima koje nemaju metalne traverze.

Vreme t_2 određeno je vremenskim podešenjem relejne zaštite.

S obzirom na (3.188) i (3.190), iz (3.185) dobija se, konačno,

$$P(A) = \nu\lambda_1^2 \frac{t_1}{8760} \frac{t_2}{8760} \left(\frac{l}{100}\right)^2. \tag{3.192}$$

Kako se iz (3.192) vidi, verovatnoća nastanka dvostrukih zemljospojeva srazmerna je drugom stupnju ukupne dužine vodova mreže. Ona je takođe direktno srazmerna dužini trajanja pogona sa zemljospojem, što je vrlo značajno pošto se na pomenuto vreme može efikasno uticati primenom odgovarajuće tehnike signalizacije i zaštite.

Verovatno ukupno trajanje dvostrukog zemljospoja u periodu posmatranja T izračunava se, saglasno opštoj definiciji verovatnoće kvara, kao

$$\tau_A = P(A)\, T \tag{3.193}$$

Verovatni broj dvostrukih zemljospojeva u periodu T dobija se kada se vreme τ_A podeli sa vremenom t_2 koliko traje svaki kvar pojedinačno

$$f_A = \frac{\tau_A}{t_2} = \frac{P(A)\, T}{t_2}. \tag{3.194}$$

Verovatna periodičnost kvarova je

$$\Theta_A = \frac{1}{f_A} = \frac{t_2}{P(A)\, T}. \tag{3.195}$$

Pretpostavimo, primera radi, da vazdušna distributivna mreža sa $l=100$ km i $t_2=0{,}5$ s radi sa jednofaznim zemljospojevima $t_1=24$ h. Neka je broj neprolaznih jednofaznih zemljospojeva $\lambda_1=30$ (1/100 km god.), a $\nu=1{,}5$.

Prema (3.192) verovatnoća nastanka dvostrukog zemljospoja iznosi

$$P(A) = 1{,}5 \cdot 30^2 \frac{24}{8760} \cdot \frac{0{,}5}{8760\,3600} \left(\frac{100}{100}\right)^2 = 5{,}88\,10^{-8}.$$

Broj pomenutih kvarova u toku godine iznosi, saglasno (3.194),

$$f_A = \frac{5{,}88 \cdot 10^{-8}}{0{,}5} \cdot 3600 \cdot 8760 = 3{,}69 \ \text{1/god}$$

a periodičnost kvarova je

$$\Theta_A = \frac{1}{3{,}69} = 0{,}27 \ \text{god} = 3{,}24 \ \text{mes}.$$

3.8.3. VEROVATNOĆA DVOSTRUKOG ZEMLJOSPOJA SA JEDNIM KVAROM U TS-SREDNJI/NISKI NAPON

Verovatnoća nastanka dvostrukog zemljospoja sa bar jednim kvarom u *TS* — srednji/niski napon vrlo je važna za gradske distributivne mreže zbog, kako je ranije pomenuto, opasnosti prenošenja potencijala u mrežu niskog napona.

Razmatrana verovatnoća može se proceniti primenom formule potpune verovatnoće

$$P(B) = P(\alpha_1)\, P(B/\alpha_1) + P(\alpha_2)\, P(B/\alpha_2), \tag{3.196}$$

gde je

- $P(B)$ — verovatnoća dvostrukog zemljospoja sa bar jednim kvarom u *TS*-srednji/niski napon,
- $P(\alpha_1)$ — verovatnoća jednofaznog zemljospoja u *TS*-srednji/niski napon,
- $P(B/\alpha_1)$— verovatnoća zemljospoja ispravne faze na bilo kom mestu mreže van *TS* u jednofaznom zemljospoju, posle uspostavljanja zemljospoja,
- $P(\alpha_2)$ — verovatnoća jednofaznog zemljospoja u mreži van *TS*-srednji/niski napon,
- $P(B/\alpha_2)$— verovatnoća zemljospoja ispravne faze u nekoj od *TS*-srednji/niski napon, posle jednofaznog zemljospoja u mreži van *TS*.

Simboli B, α_1, B/α_1, α_2, B/α_2 označavaju odgovarajuće događaje.

Verovatnoća $P(\alpha_1)$ može se, analogno (3.186) izračunati kao

$$P(\alpha_1) = \frac{n\, f_{T1}\, t_1}{T}. \tag{3.197}$$

Ovde je

- n — broj *TS*-srednji/niski napon u mreži,
- f_{T1} — prosečan broj jednofaznih zemljospojeva u *TS*-srednji/niski napon u posmatranoj mreži u toku usvojenog perioda posmatranja T, po jednoj *TS*.

Ovaj podatak se dobija statističkom analizom kvarova u mreži u dužem periodu.

Događaj B/α_1 može nastati ako do zemljospoja ispravne faze dođe u mreži van *TS* u jednofaznom zemljospoju, ili u nekoj drugoj *TS*. Ako verovatnoću prvog od pomenutih događaja označimo sa P_{V2}, a drugog sa P_{t2}, biće, pošto se ovi događaji međusobno isključuju,

$$P(B/\alpha_1) = P_{V_2} + P_{t_2} \tag{3.198}$$

Verovatnoće P_{V2} i P_{t_2} jednake su

$$P_{\nu_2} = \frac{\lambda_{\nu_2} l}{100} \frac{t_2}{T}, \tag{3.199}$$

$$P_{t_2} = (n-1)\, \frac{f_{T_2}\, t_2}{T} \tag{3.200}$$

gde je

λ_{v_2}— broj zemljospojeva ispravnih faza na vodovima mreže koji bi se imali kada bi mreža radila u zemljospoju u periodu T, sveden na 100 km,

f_{T_2} — broj zemljospojeva ispravnih faza u *TS*-srednji/niski napon koji bi nastali kada bi mreža radila u zemljospoju u periodu T, po jednoj *TS*.

Analogno (3.198), verovatnoća $P(\alpha_2)$ jednaka je

$$P(\alpha_2)=P_{v_1}+P_{t_1} \tag{3.201}$$

gde su sa P_{v_1} i P_{t_1} označene verovatnoće jednofaznih zemljospojeva na vodovima ili drugim *TS*, van posmatrane, respektivno. Ovde je, slično (3.199) i (3.200),

$$P_{v_1}=\frac{\lambda_{v_1} l}{100}\frac{t_1}{T}, \tag{3.202}$$

$$P_{t_1}=(n-1)\frac{f_{T_1} t_1}{T}, \tag{3.203}$$

sa odgovarajućim značenjem parametara koji se sada odnose na jednofazne zemljospojeve.

Između razmatranih parametara mogu se uspostaviti veze

$$\lambda_{v_2}=\nu_v \lambda_{v_1}, \quad \nu_v \geqslant 1 \tag{3.204}$$

$$f_{T_2}=\nu_T f_{T_1}, \quad \nu_T \geqslant 1 \tag{3.205}$$

u kojima se preko sačinioca ν uzimaju u obzir pogoršani uslovi rada mreže, isto kao u (3.191).

Verovatnoća $P(B/\alpha_2)$ jednaka je

$$P(B/\alpha_2)=\frac{n f_{T_2} t_2}{T}. \tag{3.206}$$

S obzirom na (3.196) do (3.206) za verovatnoću dvostrukog zemljospoja dobija se, posle sređivanja,

$$P(B)=\left[\frac{\lambda_{v_1} l}{100} f_{T_1}(\nu_v+\nu_T)+2(n-1) f_{T_1}{}^2 \nu_T\right] n \frac{t_1}{T}\frac{t_2}{T}. \tag{3.207}$$

Ako se ima u vidu da je obično $n \gg 1$, i pretpostavi $\nu_v=\nu_T=\nu$, izrazu (3.207) može se dati oblik

$$P(B)=2(\lambda_{v_1}+\varepsilon)\nu\varepsilon \cdot \frac{t_1}{T}\cdot\frac{t_2}{T}\left(\frac{l}{100}\right)^2 \tag{3.208}$$

U (3.208) uveden je parametar ε definisan relacijom

$$n f_{T_1}=\varepsilon\frac{l}{100}. \tag{3.209}$$

Pomenuti parametar predstavlja broj jednofaznih zemljospojeva koji se u periodu T dogodio u *TS*-srednji/niski napon na 100 km dužine mreže.

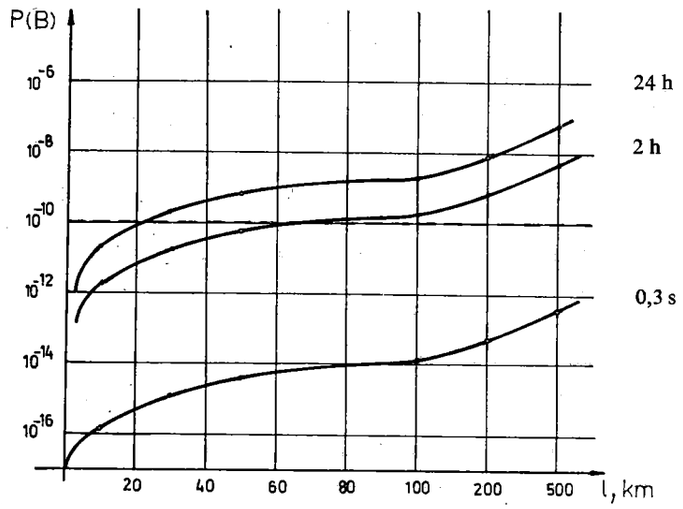
Karakteristični pokazatelji za razmatranu verovatnoću određuju se, analogno (3.193) do (3.195), kao

$$\tau_B=P(B)T, \tag{3.210}$$

$$f_B=\frac{P(B)T}{t_2}, \tag{3.211}$$

$$\theta_B=\frac{1}{f_B}. \tag{3.212}$$

Na sl. 3.44 prikazana je verovatnoća $P(B)$ prema (3.208) kao funkcija ukupne dužine mreže, za tri karakteristične vrednosti vremena t_1. Najniže vreme t_1 postiže se kada je u mreži primenjena zemljospojna zaštita. Krive su nacrtane za vrednosti karakterističnih parametara prema tabeli 3.7. Navedeni podaci mogu orijentaciono odgovarati kablovskim distributivnim mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom, napona 10 ili 20 kV. Parametrima λ_{v_1} i ε obuhvaćeni su samo stabilni, neprolazni zemljospojevi.



Sl. 3.44

TABELA 3.7

λ_{v1} 1/100 km god.	ε 1/100 km god.	ν	t_2 s
7	3	1,5	0,3

3.8.4. GRANIČNE DUŽINE MREŽA

Treba imati u vidu da je stvarna verovatnoća nepoželjnih posledica dvostrukih zemljospojeva manja od same verovatnoće događaja $P(B)$. Struja dvofaznog zemljospoja, naime, ne mora kod svakog zemljospoja da ima kritično velike vrednosti koje mogu da prouzrokuju opasne napone ili neke druge nepoželjne posledice. Ove vrednosti zavise od mesta kvara, karakteristika kablova, redukcionog faktora, kao i primenjenih načina zaštite od opasnih napona u mreži niskog napona.

Mogućnost opasnih dodira se znatno smanjuje izjednačavanjem potencijala kod potrošača na niskom naponu. Krive na sl. 3.44 daju, prema tome, gornju, sigurnu granicu verovatnoće nepovoljnih efekata. Tačnije procene stvarne opasnosti od dvostrukih zemljospojeva, uz uvažavanje svih faktora od uticaja mogu se dobiti analizom za svaku *TS*-srednji/niski napon ponaosob, imajući u vidu konkretne uslove u mreži.

Ako se kao merodavna, za gradske kablovske mreže usvoji verovatnoća $P(B)$, što se može smatrati opravdanim kod mreža sa kratkim vodovima i znatnim snagama trofaznog kratkog spoja, naročito u slučajevima kada u niskonaponskoj mreži nije sistematski sprovedeno izjednačavanje potencijala, tehničke granice mreže sa gledišta dvostrukih zemljospojeva mogle bi se odrediti iz uslova da verovatni broj ovih kvarova sa jednim zemljospojem u *TS*-srednji/niski napon u toku pogonskog veka T_p mreže bude manji od 1,

$$f_B = \frac{P(B)\,T_p}{t_2} < 1. \tag{3.213}$$

Granična dozvoljena verovatnoća razmatranih kvarova bila bi prema (3.213)

$$P(B) < \frac{t_2}{T_p}. \tag{3.214}$$

Ako se, na primer, usvoji $t_2=0{,}3$ s i $T_p=20$ god. dobija se

$$P(B) < 4{,}76 \cdot 10^{-10}. \tag{3.215}$$

Sigurnosti radi može se usvojiti

$$P(B) < 10^{-10}.$$

Iz dijagrama na sl. 3.44 vidi se da su granične dužine mreže, pri kojima je zadovoljen uslov (3.215), reda 20 km za $t_1=24$ h, a reda $60 \div 70$ km za $t_1=2$ h. Dobijene procene pokazuju da dvofazni zemljospojevi mogu da predstavljaju ograničenje za primenu izolovane neutralne tačke u mrežama u kojima se ne može obezbediti blagovremena signalizacija i otklanjanje jednofaznih zemljospojeva, tako da ovi traju 24 h ili duže.

Ako se u mreži primenjuje takva tehnika signalizacije i organizacija odgovarajućih službi da se zemljospojevi eliminišu do 2 h posle pojave, verovatnoća nastanka razmatranih zemljospojeva biće zanemarljiva u najvećem broju slučajeva. Kada je u mreži primenjena brza zemljosopjna zaštita, opasnost od dvofaznih zemljospojeva praktično ne postoji, tako da u ovom pogledu nema nikakvih ograničenja za pogon sa izolovanom neutralnom tačkom.

4. MREŽE SA KOMPENZACIJOM STRUJE JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA

Kada struje jednofaznog zemljospoja pređu izvesne granične vrednosti, verovatnoća samogašenja ovih struja znatno se smanjuje. Većina jednofaznih zemljospojeva, čak i u slučajevima kada su nastali od prolaznih uzroka koji nisu izazvali neobnovljivo narušavanje izolacije, ostaje tako kao postojan, trajan kvar koji se može otkloniti samo isključenjem sa napona. Kada su struje jednofaznog zemljospoja veće od pomenutih graničnih vrednosti, rad sa izolovanom neutralnom tačkom gubi svoju osnovnu odliku sadržanu u održavanju uslova za samogašenje jednofaznih zemljospojeva, bez potrebe za intervencijama koje uznemiruju potrošače.

Da bi se navedeno svojstvo postiglo i u mrežama veće prostranosti, sa nadkritičnim strujama jednofaznog zemljospoja, struje kroz mesto kvara mogu se umanjiti tako što će se na pomenutu, pretežno kapacitivnu struju, superponirati induktivna struja ostvarena priključenjem induktivnog kalema (prigušnice) u neutralnu tačku mreže. Podesnim podešavanjem prigušnice može se sasvim poništiti kapacitivna komponenta struje zemljospoja i tako postići uslovi za samogašenje. Opisani postupak u tehničkoj literaturi naziva se obično »kompenzacijom« struje jednofaznog zemljospoja.

4.1. STACIONARNE VREDNOSTI NAPONA I STRUJA PRI JEDNOFAZNOM ZEMLJOSPOJU

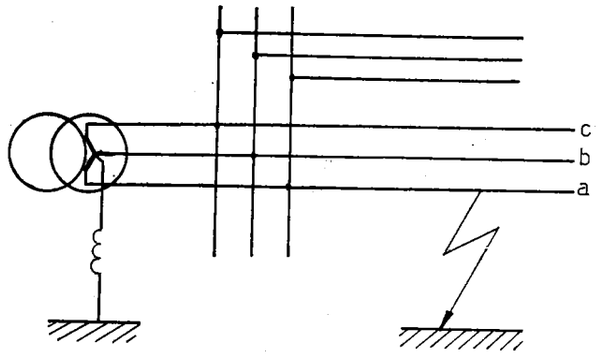
4.1.1. OSNOVNI HARMONICI NAPONA I STRUJA

Pretpostavimo da je na jednom od vodova kompenzovane mreže na fazi »*a*« došlo do postojanog jednofaznog zemljospoja sa zanemarljivo malim otporom luka na mestu kvara (sl. 4.1).

Struja jednofaznog zemljospoja može se odrediti prema opštoj formuli (1.72).

Šema impedansi za α redosled se u posmatranom slučaju poklapa u svemu sa odgovarajućom šemom mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, prikazanom na sl. 3.2. Budući da je priključena u neutralnoj tački, koja se u α redosledu nalazi na nultom potencijalu, kompenzaciona prigušnica utiče samo na šemu za nulti redosled.

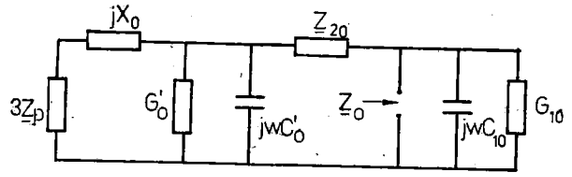
Impedansa mreže $\underline{Z}_\alpha$ ima, s obzirom na podudarnost šema α-redosleda, vrednost prema (3.1).



Sl. 4.1

Šema impedansi za nulti redosled, za razliku od šeme na sl. 3.3, sadrži granu sa reaktansom napojne mreže i transformatora jX_0, i impedansom prigušnice (sl. 4.2).

$$\underline{Z}_p = R_p + jX_p \tag{4.1}$$



Sl. 4.2

Ova poslednja je, budući da provodi trostruku nultu komponentu struje, u šemi uvećana tri puta.

Značenje ostalih simbola u šemi isto je kao za sl. 3.3.

Pošto je uvek

$$Z_{20} \ll \frac{1}{\left| \dfrac{1}{3\,\underline{Z}_p + j\,X_0} + G_0' + j\omega\, C_0' \right|} \tag{4.2}$$

i, pri pravilnom izboru napojnog transformatora,

$$X_0 \ll 3\,Z_p, \tag{4.3}$$

za ekvivalentnu impedansu mreže može se, saglasno sl. 4.2, pisati

$$\underline{Z}_0 \approx \frac{1}{G_0 + j\omega C_0 + \dfrac{1}{3\,\underline{Z}_p}}. \tag{4.4}$$

U (4.4) smo sa G_0 i C_0 označili ukupnu aktivnu odvodnost i kapacitet mreže za nulti redosled, saglasno (3.3).

Budući da članovi u imeniocu izraza (4.4) imaju u praktičnim uslovima red vrednosti 10^{-3} i manji, biće uvek

$$\frac{\underline{Z}_\alpha}{\underline{Z}_0} \ll 1, \tag{4.5}$$

isto kao i kod izolovane mreže.

S obzirom na (4.5) i (1.72) za struju zemljospoja se dobija, ako se $\underline{U}_{ra}$ položi u realnu osu kompleksne ravni,

$$\underline{I}_z = \frac{3\,U_{ra}}{2\,\underline{Z}_\alpha + \underline{Z}_0} \approx \frac{3\,U_{ra}}{\underline{Z}_0}, \tag{4.6}$$

ili, u skladu sa (4.4),

$$\underline{I}_z = \left[3\,(G_0 + j\omega C_0)\,\frac{1}{\underline{Z}_p} \right] U_{ra}. \tag{4.7}$$

Pošto je

$$\frac{1}{\underline{Z}_p} = \frac{R_p}{R_p^2 + X_p^2} - j\,\frac{X_p}{R_p^2 + X_p^2} \approx \frac{R_p}{X_p^2} - j\,\frac{1}{X_p}, \tag{4.8}$$

za struju $\underline{I}_z$ može se pisati

$$\underline{I}_z = \left(3\,G_0 + \frac{R_p}{X_p^2} \right) U_{ra} + j \left(3\,\omega C_0 - \frac{1}{X_p} \right) U_{ra}. \tag{4.9}$$

Kako se iz (4.9) vidi, podesnim izborom vrednosti reaktanse prigušnice može se potpuno poništiti reaktivna komponenta struje zemljospoja, odnosno »kompenzovati« kapacitivna struja mreže.

Formuli (4.9) može se dati oblik

$$\underline{I}_z = (\delta + j\,\nu)\,I_c, \tag{4.10}$$

gde je sa I_c označena kapacitivna struja mreže

$$I_c = 3\,\omega\,C_0\,U_{ra}. \tag{4.11}$$

Parametri δ i ν definisani su izrazima

$$\delta = \frac{G_0}{\omega C_0} + \frac{R_p}{X_p} \left(\frac{\omega_{1i}}{\omega} \right)^2, \tag{4.12}$$

$$\nu = 1 - \left(\frac{\omega_{1i}}{\omega} \right)^2. \tag{4.13}$$

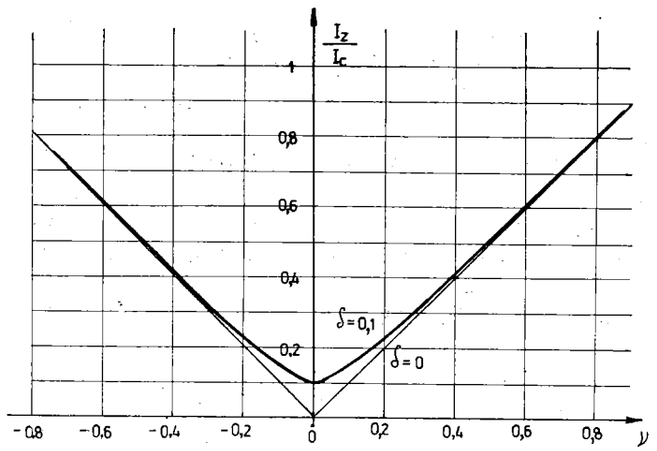
Sa ω_{1i} označena je kružna učestanost sopstvenih oscilacija nulte šeme mreže, nakon učinjenih uprošćenja, ako se zanemare gubici

$$\omega_{1i} = \frac{1}{\sqrt{3\,L_p\,C_o}}. \tag{4.14}$$

Iz (4.10) se vidi da parametri δ i ν predstavljaju relativne vrednosti aktivne i kapacitivne komponente struje jednofaznog zemljospoja u kompenzovanoj mreži, računate u odnosu na struju I_c. Struja I_c nije inače ništa drugo do kapacitivna komponenta struje jednofaznog zemljospoja koja bi tekla kroz mesto kvara kada mreža ne bi bila kompenzovana (Odeljak 3.1).

U pogledu podešenosti prigušnice treba razlikovati tri slučaja: $\nu>0$, $\nu=0$ i $\nu<0$. U prvom slučaju mreža je »potkompenzovana« pošto kroz mesto kvara protiče nekompenzovani deo kapacitivne struje mreže I_c. U drugom slučaju, pomenuta struja je potpuno poništena induktivnom komponentom struje kroz prigušnicu, tako da je mreža potpuno kompenzovana. Kada je $\nu<0$, reaktivna komponenta struje kroz mesto kvara ima induktivan karakter pošto je reaktivna komponenta struje prigušnice veća od struje I_c. U posmatranom slučaju mreža je »prekompenzovana«.

Na sl. 4.3 prikazana je zavisnost odnosa $\frac{I_z}{I_c}$ od veličine ν za $\delta=0$ i $\delta=0{,}1$, saglasno (4.10). Zbog svog karakterističnog oblika dati dijagrami često se nazivaju *V*-krivama struje jednofaznog zemljospoja.



Sl. 4.3

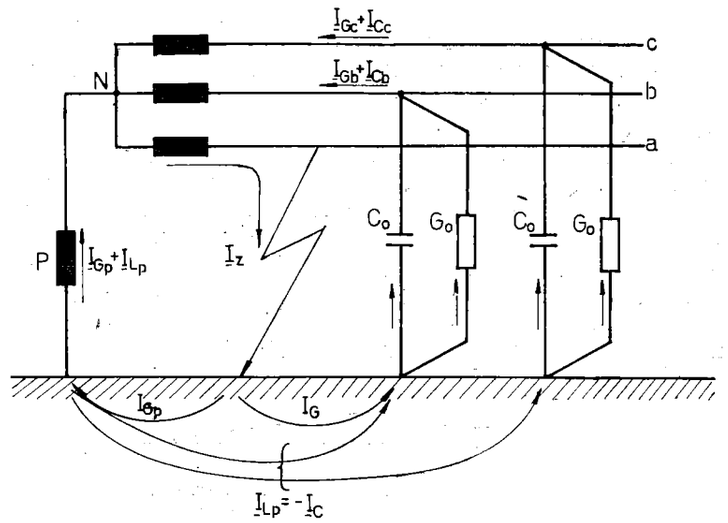
S obzirom na (4.5), i kod kompenzovanih mreža naponi ispravnih faza u stacionarnom režimu sa zemljospojem postaju jednaki međufaznim radnim naponima, kako je to ranije pokazano za mreže sa izolovanom neutralnom tačkom,

$$\underline{U}_b=\underline{U}_{rb}-\underline{U}_{ra}, \tag{4.15}$$

$$\underline{U}_c=\underline{U}_{rc}-\underline{U}_{ra}. \tag{4.16}$$

Svi dobijeni izrazi za struje i napone važe nezavisno od mesta zemljospoja u mreži pošto na pomenute veličine, kako se vidi, praktično ne utiču redne impedanse vodova.

Radi dobijanja potpunije predstave o prilikama pri jednofaznom zemljospoju, na sl. 4.4 prikazana je raspodela struja kod zemljospoja faze »*a*« na početnom kraju distributivnog voda napajanog iz *TS* sa kompenzacionom prigušnicom.



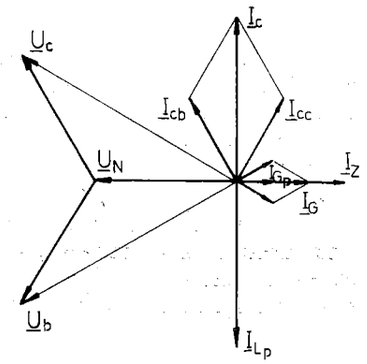
Sl. 4.4

Na sl. 4.5 predstavljen je fazorski dijagram napona i struja za razmatrani kvar u kome je kao referentan, usvojen fazor napona napajanja pogođene faze. Slike su nacrtane za slučaj potpune kompenzacije.

Struje $\underline{I}_{cb}$ i $\underline{I}_{cc}$ kasne za 90° za naponima $\underline{U}_c$ i $\underline{U}_b$, u skladu sa usvojenim pozitivnim smerovima na sl. 4.4. Ukupna kapacitivna struja mreže I_c jednaka je zbiru pomenutih struja. Iz dijagrama na sl. 4.5 lako se zaključuje, kako je pokazano u 3.1, da se ovako dobijena struja I_c zaista poklapa sa odgovarajućom strujom prema izrazu (4.11). Isto se tako jednostavno pokazuje, na osnovu fazorskog dijagrama, da je aktivna komponenta struje mreže

$$\underline{I}_G=\underline{I}_{Gb}+\underline{I}_{Gc}=3\,G_0\,U_{ra},$$

što je takođe u skladu sa (4.9).



Sl. 4.5

Kako se sa dijagrama na sl. 4.5 vidi, neutralna tačka transformatora dolazi na napon $-U_{ra}$. Induktivna komponenta struje kroz prigušnicu, $\underline{I}_{Lp}$, prednjači pomenutom naponu za 90°, a aktivna komponenta $\underline{I}_{Gp}$ mu stoji u opoziciji, saglasno pozitivnim smerovima usvojenim na sl. 4.4.

U slučaju potpune kompenzacije je $\underline{I}_{Lp}+\underline{I}_c=0$, tako da se dobija (sl. 4.5)

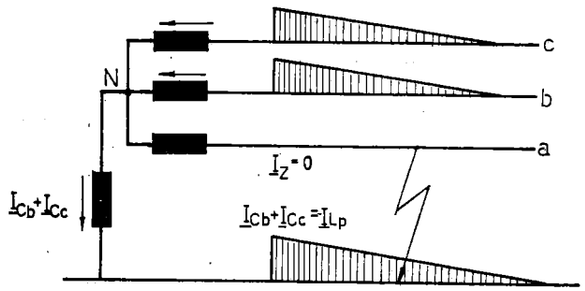
$$\underline{I}_z=\underline{I}_{Gp}+\underline{I}_G,$$

što je takođe u potpunom skladu sa (4.9).

Slika 4.4 prikazuje da struje kapacitivnih i aktivnih odvodnosti ispravnih faza teku do neutralne tačke transformatora. Ovo isto važi i za sve ostale vodove mreže. Prema tome, sa strane mreže u neutralnu tačku transformatora dolazi zbirna struja odvodnosti svih vodova.

Pomenuta struja deli se na dva dela. Jedan deo teče po neispravnoj fazi voda pogođenog kvarom do mesta zemljospoja i predstavlja struju zemljospoja I_z. Kod potpuno kompenzovanih mreža navedena struja sastoji se samo od aktivnih komponenti struja vodova i prigušnice. Drugi deo struje prolazi kroz prigušnicu i, preko povratnih puteva u tlu, zatvara kapacitivne strujne krugove.

Kako se vidi iz sl. 4.4 i sl. 3.4, struje po vodovima imaju iste tokove kao u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom. Jedina razlika je u struji koja teče po neispravnoj fazi voda u kvaru. Zbog uticaja prigušnice ova struja predstavlja samo deo zbirne struje vodova i to, po pravilu, vrlo mali deo ove struje.



Sl. 4.6

Na sl. 4.6 prikazana je šematski raspodela struja u fazama i tlu za vod u potpuno kompenzovanoj mreži kod jednofaznog zemljospoja, kada se zanemari uticaj aktivnih otpornosti i odvodnosti. Budući da su vodovi elementi sa raspodeljenim parametrima, kapacitivne struje ispravnih faza postepeno rastu po vrednosti od krajeva vodova do napojnog transformatora. Kroz fazu pogođenu kvarom zbog idealnog podešenja prigušnice ne protiče nikakva struja.

Struje ispravnih faza sabiraju se i kroz kompenzacionu prigušnicu odvode u tle preko koga se zatvaraju kapacitivni strujni krugovi ispravnih faza. Kod potpune i idealizovane kompenzacije, kapacitivne struje u celosti prolaze kroz prigušnicu i poklapaju se po vrednosti sa strujom prigušnice.

4.1.2. NAPON U NEUTRALNOJ TAČKI U NORMALNOM POGONU

Kako je pokazano u 2. Poglavlju, napon u neutralnoj tački može se izračunati kao proizvod napona U_{iN} koji bi se u neutralnoj tački imao kada bi mreža bila izolovana i sačinioca $\underline{K}_z$ koji zavisi od načina uzemljenja.

Kod nekompenzovanih mreža admitansa uzemljenja neutralne tačke jednaka je (Tačka 4.1.1):

$$\underline{Y}_N=\frac{R_p}{X_p^2}-j\frac{1}{X_p}. \tag{4.17}$$

Nulta admitansa mreže je

$$\underline{Y}_0=G_0+j\omega C_0 \tag{4.18}$$

Kada se navedene admitanse uvrste prema (4.17) i (4.18) u opšti izraz (2.8), dobija se:

$$\underline{K}_z=\frac{3G_0+j3\omega C_0}{3G_0+\frac{R_p}{X_p^2}+j\left(3\omega C_0-\frac{1}{X_p}\right)}. \tag{4.19}$$

Ako se imenilac i brojilac u (4.19) podele sa $3\omega C_0$, u skladu sa (4.12) i (4.13) može se pisati:

$$\underline{K}_z=\frac{j+\frac{G_0}{\omega C_0}}{\delta+j\nu} \tag{4.20}$$

odnosno

$$\underline{K}_z=\frac{\sqrt{1+\left(\frac{G_0}{\omega C_0}\right)^2}}{\sqrt{\delta^2+\nu_2}}\approx\frac{1}{\sqrt{\delta^2+\nu^2}}. \tag{4.21}$$

Na sl. 4.7. zavisnost sačinioca K_z od parametra ν prikazana je grafički za $\delta=0{,}05$ i $0{,}1$. Navedene vrednosti predstavljaju donju i gornju granicu sačinioca δ u praktičnim uslovima.

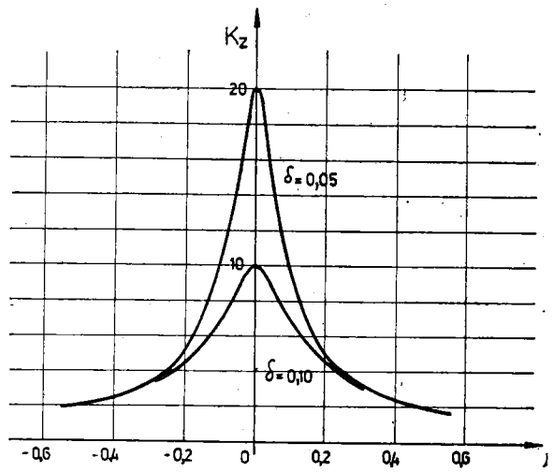
Napon u neutralnoj tački kompenzovane mreže jednak je, znači, na osnovu (2.4) i (4.21)

$$U_N=\frac{U_{iN}}{\sqrt{\delta^2+\nu^2}}. \tag{4.22}$$

Kod potpune kompenzacije, kada je $\nu=0$, biće

$$U_N=\frac{U_{iN}}{\delta}. \tag{4.23}$$

S obzirom na tipične vrednosti sačinioca δ napon u neutralnoj tački može, kako sledi iz (4.23) i sl. 4.7, biti i $10\div20$ puta veći od napona U_{iN} koji bi se imao da mreža nije kompenzovana.



Sl. 4.7

Kod nepreplетenih vazdušnih vodova napon U_{iN} dostiže vrednosti do 0,037 U_{nf}, ako su vodovi jednostruki (2. Poglavlje). Za slučaj potpune kompenzacije, napon neutralne tačke mogao bi se popeti na vrednosti $0{,}37 \div 0{,}74\ U_{nf}$. Ovoliko velike vrednosti ne mogu se dozvoliti, prvenstveno zbog uticaja električnog polja vodova na paralelno vođene telekomunikacione vodove, pošto je reč o trajnom pogonu. Iako razmatrana pojava ne dovodi do ozbiljnih povišenja napona faza, ona nije poželjna ni sa stanovišta izolacije opreme.

Da bi se razmatrana povišenja napona ograničila treba smanjiti asimetriju provodnika vodova prema zemlji njihovim preplitanjem. Pri tom je obično dovoljno dovesti napon U_{iN} na vrednost 0,01 U_{nf}.

Povišenje napona neutralne tačke može se efikasno ograničiti nepotpunom kompenzacijom, kako se vidi iz (4.22). Pri tom je bolje raditi sa prekompenzovanom nego potkompenzovanom mrežom, jer ova druga može da pređe u potpuno kompenzovanu pri isključenju nekog od vodova. Obično se primenjuje prekompenzacija 10%, čemu odgovara $\nu = -0{,}1$.

Visoki naponi u neutralnoj tački mogu se pojaviti pri isključenju ili prekidu jedne od faza na nekom od vodova, pošto se ovim kvari simetrija mreže i dolazi do porasta napona U_{iN}, kako je pokazano u 2. Poglavlju.

Neka je, primera radi, nulti kapacitet posmatrane faze mreže smanjen na vrednost mC_0 ($m<1$). Relativna vrednost reaktivne komponente struje zemljospoja mreže u analiziranim uslovima biće, saglasno (4.13),

$$\nu' = 1 - \frac{3}{2+m}\left(\frac{\omega_{1i}}{\omega}\right)^2. \tag{4.24}$$

Ovde je sa ω_{1i} označena sopstvena kružna učestanost idealizovane šeme mreže za nulti redosled pre isključenja faze, određena relacijom (4.14).

Pošto je, u skladu sa (4.13),

$$\left(\frac{\omega_{1i}}{\omega}\right)^2 = 1 - \nu,$$

gde je ν relativna vrednost reaktivne komponente struje zemljospoja u normalnom stanju mreže, iz (4.24) sledi

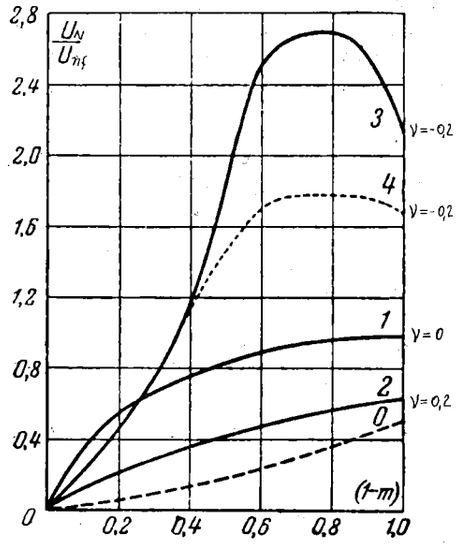
$$\nu' = \frac{3}{2+m}\nu - \frac{1-m}{2+m}. \tag{4.25}$$

S obzirom na (2.16), (2.20), (4.22) i (4.25) napon u neutralnoj tački u razmatranim uslovima dobiće vrednost

$$U_N = \frac{1-m}{2+m}\,\frac{U_{nf}}{\sqrt{\delta^2 + \left(\dfrac{3\nu - 1 + m}{2+m}\right)^2}}. \tag{4.26}$$

Pri ispadu dela faze menja se neznatno i sačinilac δ zbog smanjenja odvodnosti pomenute faze. Ova se promena može, međutim, zanemariti budući da ne utiče bitno na vrednost napona U_N.

Na sl. 4.8 prikazana je grafički zavisnost odnosa U_N/U_{nf} od veličine $1-m$ koja predstavlja relativnu vrednost nultog kapaciteta ispalog dela faze u odnosu na normalni, puni kapacitet [69]. Posmatrana zavisnost analizirana je za nekoliko karakterističnih režima neutralne tačke u normalnom pogonu koji prethodi ispadu faza.



Sl. 4.8

Kriva sa oznakom 0 odnosi se na mrežu sa izolovanom neutralnom tačkom. Kriva 4 nacrtana je uz uvažavanje zasićenja prigušnice.

Kako se vidi, do osetnih prenapona može doći kod potkompenzovane mreže. U stvarnim uslovima prenaponi u posmatranom slučaju dosta su niži zbog uticaja zasićenja kompenzacione prigušnice kod koje pri porastu napona u neutralnoj tački dolazi do znatnog smanjivanja reaktanse, usled čega se povećava sačinilac ν'.

Iz toka krive 2 opaža se povoljan uticaj prekompenzacije na naponske prilike u analiziranim okolnostima.

Prenaponi razmatrane vrste mogu se pojaviti i u slučaju znatnog nesinhronizma kontakata prekidača po fazama, koji u procesu komutacije remeti simetriju mreže. Naročito su nepoželjni otkazi delovanja pojedinih faza (polova) prekidača.

Vremenska razlika u radu faza prekidača mora se, kod kompenzovanih mreža, brižljivo kontrolisati u pogonu. Ona ne bi trebalo da iznosi više od jedne do dve poluperiode radne učestanosti [74].

4.1.3. VIŠI HARMONICI U STRUJI JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA

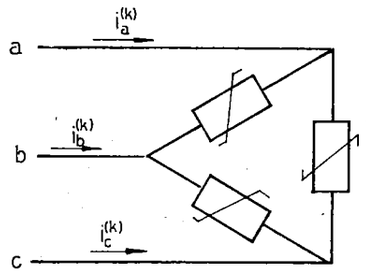
Usled nelinearnosti karakteristika pojedinih elemenata mreže i potrošača, u mreži se uspostavljaju viši harmonici napona i struja. Viši harmonici postoje i u normalnom pogonu. Kod jednofaznih zemljospojeva zbog porasta napona pojedine nelinearnosti jače se ispoljavaju što pomenutu pojavu čini nešto izraženijom.

U elemente sa nelinearnim karakteristikama treba ubrojati napojne i prijemne transformatore, različite potrošače kao što su televizori, uređaji sa stabilizatorima napona, električni motori, energetski pretvarači, zatim kompenzacione prigušnice, merne transformatore i dr. S obzirom na njihovu brojnost i ukupnu instalisanu snagu, najznačajniji izvori viših harmonika su po pravilu prijemni transformatori sa potrošačima na niskom naponu. U narednim razmatranjima ćemo zato bliže proučiti uticaje pomenutih transformatora.

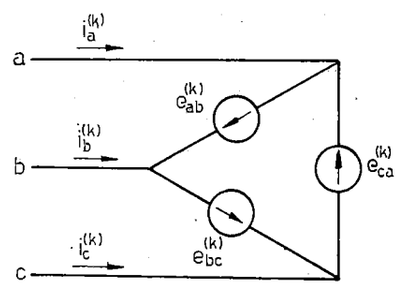
Pretpostavimo da je prijemni transformator opterećen simetrično na strani niskog napona nelinarnim potrošačima. Ako je transformator na strani distributivne mreže vezan u trougao, što je po pravilu slučaj, u zamenskoj šemi distributivne mreže on se može prikazati preko odgovarajuće sprege nelinarnih elemenata kao

na sl. 4.9. Indeksom k označeni su harmonici k-tog redosleda u strujama pojedinih faza.

Kod proračuna raspodele pojedinih harmonika u mreži, nelinearnosti u šemi na sl. 4.9 mogu se prikazati izvorima harmonika sa e. m. s. $e_{ab}^{(k)}$, $e_{bc}^{(k)}$, $e_{ca}^{(k)}$, kako je pokazano na sl. 4.10. Zaista, u elementima šeme na sl. 4.9 osnovni harmonici struje, usled nelinearnosti, stvaraju više harmonike, tako da se pomenuti elementi ponašaju kao generatori viših harmonika.



Sl. 4.9



Sl. 4.10

Ako osnovni harmonici struje grade simetričan direktan sistem e. m. s., na sl. 4.10 biće

$$e_{ab}^{(k)} = \sqrt{2}\, E^{(k)} \cos k\,\omega\, t,$$

$$e_{bc}^{(k)} = \sqrt{2}\, E^{(k)} \cos k \left(\omega\, t - \frac{2\pi}{3}\right), \tag{4.27}$$

$$e_{ca}^{(k)} = \sqrt{2}\, E^{(k)} \cos k \left(\omega\, t + \frac{2\pi}{3}\right).$$

Iz (4.27) sledi da će razmatrane e. m. s. graditi direktan redosled, ako je:

$$\frac{2\,k\,\pi}{3} = n\,2\,\pi + \frac{2\,\pi}{3} \qquad n \in (N)$$

odnosno

$$k = 3\,n + 1. \tag{4.28}$$

U slučaju

$$\frac{2\,k\,\pi}{3} = n2\,\pi - \frac{2\pi}{3}, \quad n \in (N) \tag{4.29}$$

tj.

$$k = 3\,n - 1,$$

pomenute e. m. s. stvaraće inverzan sistem, budući da će $e_{bc}^{(k)}$ prednjačiti $e_{ab}^{(k)}$ za $2\pi/3$, a ne kasniti kao u direktnom sistemu.

Izvorne e. m. s. za k-ti harmonik gradiće nulti sistem ako sve imaju jednake fazne stavove, tj. ako je

$$\frac{2\,k\,\pi}{3} = n\,2\,\pi \qquad n \in (N)$$

ili

$$k = 3\,n \tag{4.30}$$

Priroda nelinearnosti mreže je takva da je n u (4.28) i (4.29) po pravilu paran, a u (4.30) neparan broj, i u mreži se obično pojavljuju samo neparni harmonici.

Iz (4.28) sledi da 7, 13, 19, 25 ... harmonik grade direktan sistem, a 5, 11, 17, 23, ... inverzan sistem. Nulti sistem obrazuje 3, 9, 15, ... harmonik. Treba, međutim imati u vidu, da su prethodna razmatranja izvedena kada je izvor viših harmonika trofazni simetrični element mreže. Lako se pokazuje da svi harmonici usled nelinearnosti kompenzacione prigušnice formiraju nulti redosled, pošto je prigušnica priključena za neutralnu tačku mreže tako da ekvivalentna e. m. s. generatora viših harmonika pripada nultom redosledu.

Iz sl. 4.10 sledi

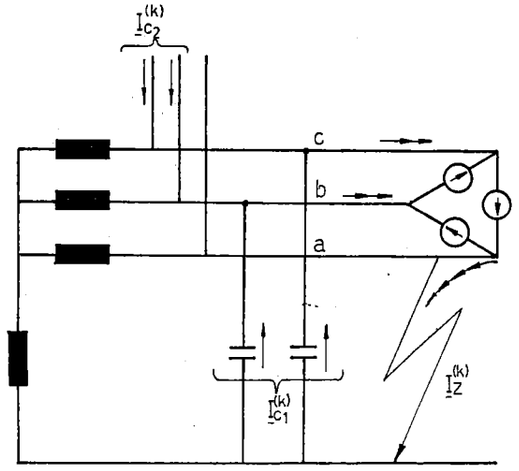
$$i_a^{(k)} + i_b^{(k)} + i_c^{(k)} = 0. \tag{4.31}$$

Kako je za harmonike koji obrazuju nulti sistem ujedno i

$$i_a^{(k)} = i_b^{(k)} = i_c^{(k)}, \tag{4.32}$$

zaključuje se da su za pomenute harmonike razmatrane struje jednake nuli. Prema tome, nelinearnosti simetrično opterećenog prijemnog transformatora ne prouzrokuju u fazama mreže više harmonike struje čiji je red deljiv sa 3. Pomenute struje zatvaraju se unutar konture koju obrazuju e. m. s. izvora u šemi na sl. 4.10.

Kod viših harmonika koji grade direktan ili inverzan redosled ispunjena je po definiciji relacija (4.31) a relacija (4.32) ne važi, tako da se uspostavljaju odgovarajuće struje po faznim provodnicima mreže. Vrednosti ovih struja zavise od konfiguracije mreže i njenih električnih parametara za određen red harmonika.



Sl. 4.11

Na sl. 4.11 prikazan je tok struja harmonika direktnog ili inverznog redosleda u slučaju jednofaznog zemljospoja na vodu kojim se napaja razmatrani nelinearni prijemni transformator. Pošto se analizira samo uticaj prijemnog transformatora, iz šeme su izostavljene e. m. s. odgovarajućeg harmonika kod drugih nelinearnih elemenata mreže, kao što su drugi prijemni transformatori i kompenzaciona prigušnica. Sa $\underline{I}_{c_1}^{(k)}$ označene su

kapacitivne struje ispravnih faza voda pogođenog kvarom a sa $\underline{I}_{c_2}^{(k)}$, odgovarajuće struje ostalih vodova u mreži vezanih za napojne sabirnice.

Na osnovu formalne analogije sa šemom mreže za proračun osnovnog harmonika struje zemljospoja može se napisati, saglasno (4.9),

$$\underline{I}_z^{(k)} = U_{ra}^{(k)} j \left(3 k \omega C_0 - \frac{1}{k \omega L_p}\right). \tag{4.33}$$

U (4.33) je sa C_0 označen ukupni nulti kapacitet po fazi svih vodova mreže, a sa $U_{ra}^{(k)}$ efektivna vrednost k-tog harmonika napona faze a u režimu bez zemljospoja. Ovaj se napon na elementaran način određuje iz fazorskog dijagrama e. m. s. na sl. 4.10. Zanemareni su uticaji aktivnih otpornosti i odvodnosti. Relacija (4.33) važi strogo ako e. m. s. viših harmonika zadržavaju posle nastanka kvara iste vrednosti kao u prethodnom normalnom pogonu, pošto je izvedena superpozicijom. Budući da se kod jednofaznog zemljospoja ne menjaju međufazni naponi od kojih zavisi radni režim prijemnog transformatora i potrošača, može se smatrati da u razmatranom slučaju ne dolazi do promena pomenutih e. m. s.

Iz (4.33) može se uočiti da je za k-ti harmonik kapacitivna komponenta struje zemljospoja k^2 puta veća od induktivne, ako su ove podešene na jednake vrednosti kod osnovnog harmonika. Kompenzacioni efekat prigušnice zbog toga ne dolazi do izražaja i struja $\underline{I}_L^{(k)}$ ima zanemarljivo male vrednosti.

Kako se vidi na sl. 4.11, tokovi viših harmonika struja po ispravnim fazama odgovaraju onima koje se imaju za osnovne harmonike kod izolovanih mreža. Struje viših harmonika dotiču ka vodu u kvaru iz svih delova mreže, tako da su u pomenutom vodu viši harmonici najizrazitiji.

U Tabeli 4.1 navedeni su podaci o sadržaju viših harmonika u struji jednofaznog zemljospoja dobijeni merenjem u pojedinim srednjonaponskim kompenzovanim mrežama u Poljskoj [77]. U Tabeli se daju relativne efektivne vrednosti harmonika računate u odnosu na efektivnu vrednost osnovnog harmonika ukupne kapacitivne struje mreže.

TABELA 4.1

HARMONICI	Kablovska mreža		Vazdušna mreža	
	6 kV	10 kV	15 kV	20 kV
$\frac{I^{(3)}}{I_C} 100$	2,9÷3,1	0,9	~0,5	3,5÷7
$\frac{I^{(5)}}{I_C} 100$	7÷8,5	14÷20	6÷11	~2
$\frac{I^{(7)}}{I_C} 100$	3	10	8÷17	~1
$\frac{I^{(23)}}{I_C} 100$	10÷36	—	~0,3	—
$\frac{\sqrt{\Sigma (I^{(i)})^2}}{I_C} 100$	10÷37	18÷22	*) 18÷30	~8

*) Registrovani su takođe i jako izraženi 11. i 14. harmonik.

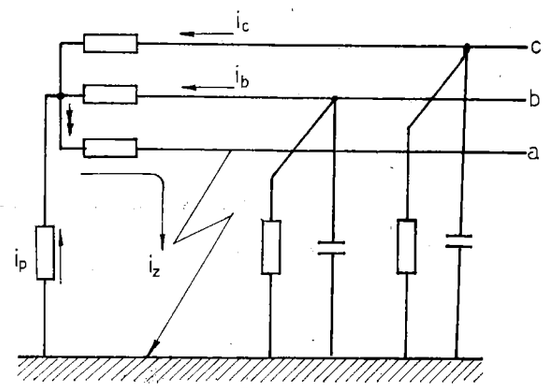
Pojava harmonika 23-reda posledica je, kako se smatra, napajanja pretvaračkih uređaja.

Jako izraženi 5. harmonik konstatovan je i u eksperimentima u kablovskim mrežama 5 kV u Austriji [50]. U mrežama kod kojih su se neposredno preko sabirnica visokog napona napajali pretvarački uređaji, zabeleženi su kao osetni, pored petog i sedmi i deveti harmonik.

4.2. PRELAZNE POJAVE PRI NASTANKU JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA

Pretpostavimo da je do zemljospoja došlo na fazi »*a*« sabirnica transformatora koji napaja distributivnu mrežu (sl. 4.12).

Posle rasterećivanja faze pogođene kvarom koji se odvija preko talasnih procesa (opisanih u 1.1.2), nastupa period opterećivanja ispravnih faza i prigušnice usled nastale promene u naponima napajanja. Proučavanje pomenutog procesa znatno se uprošćava ako se ima u vidu da kompenzaciona prigušnica zbog svoje



Sl. 4.12

velike induktivnosti nebitno utiče na tok brzo promenljivih komponenti napona i struja u mreži, pošto ovima suprotstavlja vrlo veliku, praktično beskonačnu impedansu. Sa stanovišta brzo promenljivih komponenti razmatranih procesa može se smatrati da kompenzaciona prigušnica ne postoji i da se prema tome, ovi procesi odvijaju približno jednako kao kod izolovane mreže. Prenaponske pojave koje prate proces opterećivanja ispravnih faza nakon zemljospoja otuda se nebitno razlikuju od tokova opisanih u 3.3 i imaju jednake karakteristične vrednosti.

Proces opterećivanja prigušnice je najsporiji zbog velike vremenske konstante prigušnice. Zbog pomenute sporosti može se smatrati da proces uspostavljanja struje kroz prigušnicu počinje posle isteka prolaznih procesa opterećivanja ispravnih faza i da se odvija potpuno nezavisno od navedenih procesa.

Struja jednofaznog zemljospoja jednaka je, u skladu sa sl. 4.12,

$$i_z = i_b + i_c + i_p. \tag{4.34}$$

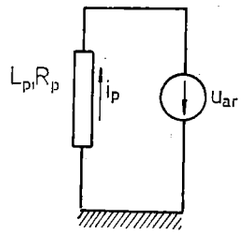
Struje i_b i i_c imaju jednake vrednosti kao kod izolovane mreže budući da ispravne faze takođe dolaze na složene napone prema zemlji.

Pošto neutralna tačka transformatora pri zemljospoju posle isteka procesa opterećivanja ispravnih faza dolazi na potencijal $-u_{ar}$, ako se sa u_{ar} označi napon neispravne faze bez zemljospoja, vremenski tok struje i_p može se izračunati iz šeme prikazane na sl. 4.13.

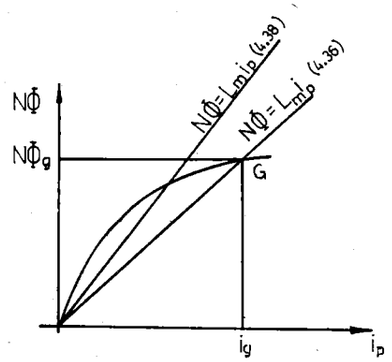
Pod uticajem uspostavljenog napona u prigušnici se formira magnetni fluks saglasno zakonima ravnoteže e. m. s. u posmatranoj konturi

$$u_{ar} = N\frac{d\Phi}{dt} + \frac{R_p}{L_m} N\Phi. \tag{4.35}$$

U (4.35) je sa N označen broj navojaka prigušnice, a sa L_m srednja induktivnost prigušnice u opsegu promene fluksa Φ.



Sl. 4.13



Sl. 4.14

Može se približno usvojiti [3]

$$L_m \approx \frac{N\Phi_g}{i_g}, \tag{4.36}$$

gde je sa Φ_g označena granična vrednost fluksa u magnetnom kolu u prelaznom procesu, a sa i_g struja prigušnice pri navedenoj vrednosti fluksa, saglasno karakteristici magnećenja prigušnice (sl. 4.14).

Srednja induktivnost prigušnice može se odrediti i prema formuli za srednju vrednost, poznatu u matematičkoj analizi,

$$L_m = \frac{N}{i_g}\int_0^{i_g} \frac{\Phi}{i_p}\, di_p, \tag{4.37}$$

koja potpunije obuhvata osobenosti karakteristike magnećenja.

Linearizovana karakteristika magnećenja $N\Phi = L_m i_p$ koja odgovara (4.36) predstavlja pravu koja prolazi kroz graničnu tačku G na stvarnoj karakteristici (sl. 4.14). Induktivnost L_m prema (4.37) nešto je veća nego induktivnosti izračunate na osnovu (4.36).

Primenom Laplasove transformacije na (4.35) dobija se, s obzirom da je $\Phi(0)=0$,

$$\tilde{u}_{ar} = Ns\tilde{\Phi} + \frac{R_p}{L_m} N\tilde{\Phi},$$

odakle je

$$\tilde{\Phi} = \frac{\tilde{u}_{ar}}{N\left(s + \frac{R_p}{L_m}\right)}. \tag{4.38}$$

Povratkom u vremensko područje iz (4.38) se, za $u_{ar} = \sqrt{2}\, U_{nf} \cos(\omega t + \varphi)$, izračunava

$$\Phi = \Phi_n \left[\sin(\omega t + \varphi) - e^{-\frac{t}{T}} \sin\varphi\right] \tag{4.39}$$

Veličina Φ_n predstavlja amplitudu fluksa pri nazivnom naponu

$$\Phi_n = \frac{\sqrt{2}\, U_{nf}}{N\omega}, \tag{4.40}$$

a parametar T je srednja vremenska konstanta prigušnice u razmatranom procesu

$$T = \frac{L_m}{R_p}. \tag{4.41}$$

Svoju graničnu vrednost fluks Φ postići će praktično u trenutku kada prvi od članova u zagradi u (4.39) postigne svoju ekstremnu vrednost istog polariteta kao drugi član.

Ovo će se imati u trenutku t_1 pri kome je

$$\omega t_1 + \varphi = \pi. \tag{4.42}$$

Iz (4.42) se dobija

$$t_1 = \frac{\pi - \varphi}{\omega}. \tag{4.43}$$

Maksimalna vrednost fluksa biće tako, saglasno (4.39):

$$\Phi_g \approx |\Phi(t_1)| = (1 + e^{-\frac{t_1}{T}} \sin\varphi)\, \Phi_n. \tag{4.44}$$

Iz (4.44) sledi da je

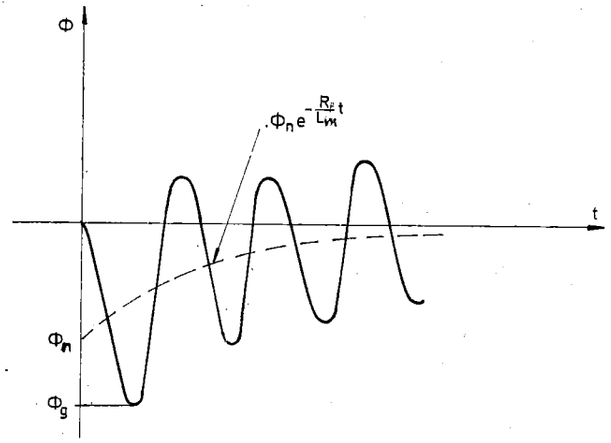
$$\Phi_g < 2\,\Phi_n. \tag{4.45}$$

Relacija (4.45) pokazuje da porast fluksa prigušnice u posmatranom prelaznom procesu nije osetan. Međutim zbog zasićenja magnetnog kola, pomenuti umereni porasti fluksa prouzrokuju znatna povećanja struja prigušnice u odnosu na njihove nazivne vrednosti, kako se vidi iz sl. 4.14. Obično je kod standardno dimenzionisanih prigušnica [6]

$$i_g \leqslant 5\, i_{np}. \tag{4.46}$$

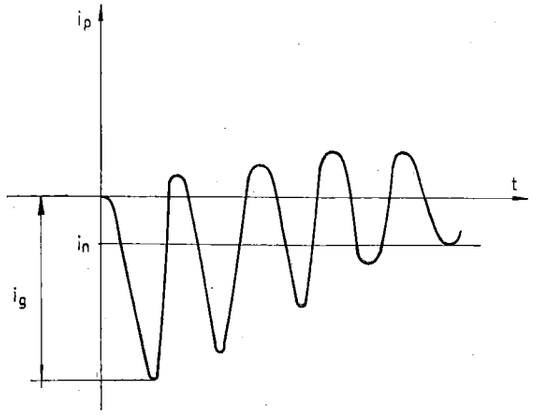
Vremenski tokovi fluksa i struje prigušnice prikazani su na sl. 4.15 i 4.16. Dijagram na sl. 4.15 nacrtan je na osnovu (4.39) uz pretpostavku $\varphi = 90°$.

Vremenski tok struje i_p na sl. 4.16 određen je iz toka fluksa saglasno karakteristici magnećenja. Kod svojih maksimalnih vrednosti struja ima zaoštreni, deformisani oblik, karakterističan za struje magnećenja u oblasti osetnih zasićenja.



Sl. 4.15

Fluks i struja prigušnice dostižu svoj stacionarni režim obično posle isteka 5 do 6 perioda, tj. za približno 0,1÷0,15 s.



Sl. 4.16

Kako se vidi, posle nastanka kvara, u prolaznom periodu do smirenja procesa u prigušnici, struja i_p je dosta veća od svoje stacionarne vrednosti i_{np}, podešene prema kapacitivnoj struji mreže. U posmatranom periodu struja i_z, koja u mesto kvara dotiče po pogođenoj fazi, ima induktivni karakter i osetne vrednosti tako da se mreža ponaša kao da je prekompenzovana. Pomenuta prolazna pojava može da posluži za otkrivanje voda sa zemljospojem i aktiviranje odgovarajuće signalizacije i zaštite.

4.3. GAŠENJE STRUJE JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA I POVRATNI NAPON

Pretpostavimo da je u određenom trenutku u mreži na sl. 4.1 u stacionarnom radu sa zemljospojem, došlo do gašenja električnog luka na mestu kvara.

Promena napona na fazi koja je bila pogođena kvarom, tj. »povratni napon« izračunava se opštim postupkom objašnjenim u 1.1.4.

Do gašenja luka dolazi pri prolasku struje zemljospoja kroz nultu vrednost. Ako pomenuti trenutak usvojimo kao početni u našim razmatranjima, vremenski tok struje potreban za proračun povratnog napona primenom superpozicije, biće oblika (relacija (4.10))

$$i_z = \sqrt{2}\sqrt{\delta^2+\nu^2}\, I_c \sin\omega t \approx \sqrt{2}\,\nu\, I_c \sin\omega t. \tag{4.47}$$

Pošto način uzemljenja neutralne tačke ne utiče na šemu mreže za α redosled, to će tok α-komponente povratnog napona u posmatranom slučaju biti sličan toku pomenute komponente kod izolovane mreže, opisanog izrazom (3.37). Navedena komponenta napona biće, tačnije rečeno, srazmerna naponu u_α'' prema (3.37) sa koeficijentom srazmere ν, koji predstavlja odnos vrednosti struja zemljospoja u dva posmatrana slučaja. Ona se prema tome, isto kao u 3.2.2, može zanemariti zbog malih vrednosti.

Tako je i kod kompenzovanih mreža povratni napon

$$u \approx u_0'' = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{3}\tilde{z}_0\,\tilde{i}_z\right\} \tag{4.48}$$

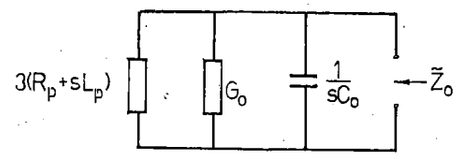
Uprošćena ekvivalentna šema mreže sa sl. 4.1, za nulti redosled, prikazana je na sl. 4.17. U šemi su zanemareni r, L parametri napojnog transformatora zbog malih vrednosti u odnosu na odgovarajuće parametre prigušnice.

Iz šeme na sl. 4.17 se izračunava, ako se označi $L_m = L_p$,

$$\tilde{z}_0 = \frac{1}{C_0}\,\frac{s+\dfrac{R_p}{L_p}}{s^2+s\left(\dfrac{G_0}{C_0}+\dfrac{R_p}{L_p}\right)+\dfrac{1}{3\,L_p\,C_0}+\dfrac{R_p\,G_0}{L_p\,C_0}}. \tag{4.49}$$

S obzirom na (4.47), ima se

$$\tilde{i}_z = \sqrt{2}\,\nu\, I_c \frac{\omega}{s^2+\omega^2} \tag{4.50}$$



Sl. 4.17

ili, saglasno (4.11),

$$\tilde{i}_z = \sqrt{2}\,\nu\, 3\, U_{ra} C_0 \frac{\omega^2}{s^2+\omega^2}. \tag{4.51}$$

Zamenom (4.49) i (4.51) u (4.48) dobija se, posle sređivanja,

$$u = \mathcal{L}^{-1}\left\{\sqrt{2}\,U_{ra}\frac{\nu\omega^2}{s^2+\omega^2}\,\frac{s+\dfrac{R_p}{L_p}}{s^2+2\,\delta\,s+\delta^2+\omega_1{}^2}\right\}. \tag{4.52}$$

U (4.52) smo označili

$$\delta = \frac{1}{2}\left(\frac{G_0}{C_0} + \frac{R_p}{L_p}\right), \tag{4.53}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_{1i}^2 - \frac{1}{4}\left(\frac{G_0}{C_0} - \frac{R_p}{L_p}\right)^2} \tag{4.54}$$

i

$$\omega_{1i} = \frac{1}{\sqrt{3 L_p C_0}}. \tag{4.55}$$

Parametar δ predstavlja koeficijent prigušenja prolazne komponente povratnog napona, ω_1 kružnu učestanost pomenute komponente a ω_{1i} iznos ove učestanosti kada se zanemare gubici energije.

Iz (4.52) se primenom (1.38) dobija, ako se uticaj gubitaka obuhvati samo preko koeficijenta prigušenja,

$$u = \sqrt{2}\, U_{ra} \frac{\nu\omega^2}{\omega^2 - \omega_1{}_i^2} (\cos\omega t - e^{-\delta t}\cos\omega_1 t). \tag{4.56}$$

Ako se sačinilac ν uvrsti u (4.56) saglasno (4.13), ima se konačno,

$$u = \sqrt{2}\, U_{ra} (\cos\omega t - e^{-\delta t}\cos\omega_{1i} t). \tag{4.57}$$

Napon u neutralnoj tački napojnog transformatora posle gašenja struje zemljospoja dobija se kada se na povratni napon (4.57) superponira napon u neutralnoj tački u režimu sa zemljospojem.

Tako se ima

$$u_N = u - u_{ra} = -e^{-\delta t}\cos\omega_{1i} t. \tag{4.58}$$

Kod potpune kompenzacije je $\omega_{1i}=\omega$, pa iz (4.57) sledi

$$u = \sqrt{2}\, U_{ra}(1 - e^{-\delta t})\cos\omega t. \tag{4.59}$$

Izraz (4.59) pokazuje da se kod potpuno kompenzovanih mreža povratni napon uspostavlja vrlo sporo, pošto koeficijenti δ obično nemaju velike vrednosti. U procesu uspostavljanja, razmatrani napon nikad ne prevazilazi vrednost normalnog radnog napona mreže. Ovu vrednost povratni napon postiže, kako se može zaključiti iz (4.59), posle vremena

$$t_1 \approx \frac{3}{\delta}. \tag{4.60}$$

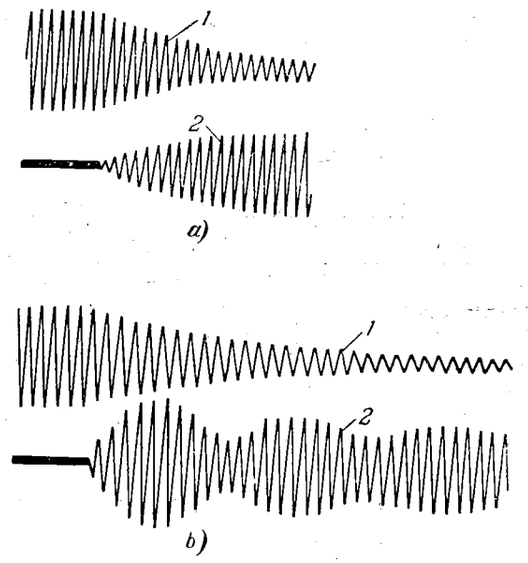
Primera radi, za $\delta=10$, što se može smatrati karakterističnom vrednošću, iz (4.60) sledi $t_1 \approx 0{,}3$ s. Napon na fazi koja je bila u kvaru dobija svoju normalnu radnu vrednost, kako se vidi, tek posle 15 perioda oscilacija 50 Hz. Isto toliko vreme je potrebno da bi se i napon u neutralnoj tački potpuno prigušio.

Kod netačno kompenzovanih mreža kružne učestanosti ω i ω_{1i} se međusobno manje ili više razlikuju i povratni napon dobija oscilatorno pulzirajući tok.

Ako se zanemari prigušenje, izraz (4.57) može se napisati u obliku

$$u = 2\sqrt{2}\, U_{ra} \sin\frac{\omega + \omega_{1i}}{2} t \sin\frac{\omega_{1i} - \omega}{2} t. \tag{4.61}$$

Kako se vidi, povratni napon osciluje sa kružnom učestanošću $(\omega+\omega_{1i})/2$ bliskom normalnoj radnoj učestanosti a amplituda mu se menja takođe harmonično, relativno sporo, sa kružnom učestanošću $(\omega_{1i}-\omega)/2$.

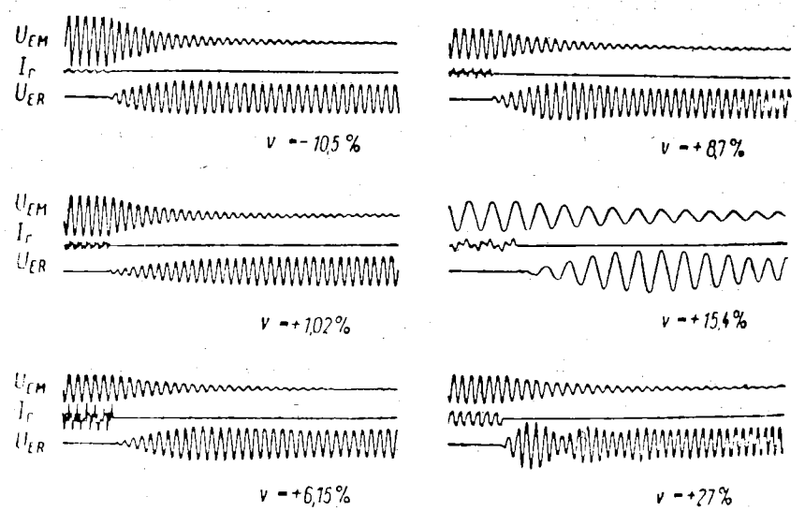


Sl. 4.18

Na slici 4.18 prikazan je tok napona u neutralnoj tački (krive 1) i povratnog napona (krive 2) u slučaju potpune kompenzacije (sl. 4.18.a) i prekompenzacije $\nu=0{,}16$ (sl. 4.18.b). Krive su nacrtane za slučaj $\delta = 4{,}24$ [2].

Na sl. 4.19 prikazani su oscilogrami napona neutralne tačke, struje zemljospoja i povratnog napona, snimljeni u jednoj kompenzovanoj mreži 15 kV, kod različitih podešenja prigušnice [16].

Dijagrami na sl. 4.18 i 4.19 pokazuju da kod većih netačnosti kompenzacije povratni napon može da dostigne i vrednosti reda $1{,}7\sqrt{2}\, U_{ra}$. Ipak, i u pomenutom slučaju amplituda povratnog napona postepeno raste u toku nekoliko perioda, usled čega se smanjuje verovatnoća ponovnog paljenja luka.



Sl. 4.19

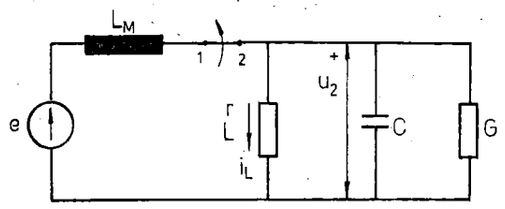
Uočava se takođe da je pod uticajem kompenzacione prigušnice iz vremenskog toka povratnog napona izostala jednosmerna komponenta, što je u skladu sa (4.57). Iz prethodnog sledi da kod dobro kompenzovanih mreža ne postoje uslovi za nastanak intermitentnih prenapona prema teorijama Petersena i Pitersa i Slipijana (Odeljak 3.4). Ako i dođe do uzastopnih paljenja i gašenja luka, ova će se pojava odvijati u znatno sporijem ritmu i biti praćena nižim prenaponima.

4.4. PRENAPONI PRI KOMUTACIJAMA U MREŽI

4.4.1. PREKIDANJE KOLA SA INDUKTIVNOSTIMA

Kod manipulacija u kompenzovanim mrežama treba voditi računa o uslovima promene režima prigušnica u kojima može da u trenutku komutacije bude zatečena znatna magnetna energija, čija preraspodela često prouzrokuje opasne prenapone. Pomenuta pojava ima istu prirodu kao i pojave pri isključivanju induktivnih elemenata, uopšte, u slučajevima kada se struja prekida pre prolaska kroz svoju prirodnu nultu vrednost.

Dobra slika o razmatranim procesima dobiće se analizom šeme na sl. 4.20.



Sl. 4.20

Induktivni element sa parametrima L i r ($r \ll \omega L$) napaja se iz mreže koja ima induktivnost L_M ($L_M \ll L$) i e. m. s.

$$e = \sqrt{2}\, E \cos(\omega t + \varphi). \tag{4.62}$$

Paralelno induktivnom elementu vezani su kapacitet i odvodnost G ($G \ll \omega C$).

Pretpostavimo da je do prekidanja struje i došlo u nekom trenutku $t=0$ kada je struja kroz induktivni elemenat imala vrednost

$$i_L(0) = i_0, \tag{4.63}$$

a napon na krajevima kapaciteta

$$u_2(0) = u_0. \tag{4.64}$$

Promena napona u_2 posle odvajanja induktivnog elementa od mreže opisuje se sledećim relacijama, saglasno smerovima usvojenim na sl. 4.20,

$$\begin{aligned} s C\tilde{u}_2 - Cu_0 + G\tilde{u}_2 + \tilde{i}_L &= 0 \\ sL\tilde{i}_L - Li_0 + r\tilde{i}_L - \tilde{u}_2 &= 0 \end{aligned} \tag{4.65}$$

Rešavanjem jednačina (4.65) po $\tilde{u}_2$ dobija se

$$\tilde{u}_2 = \frac{Cu_0(sL+r) - Li_0}{s^2 LC + s(Cr+GL) + 1 + rG}$$

ili

$$\tilde{u}_2 = \frac{1}{C} \frac{Cu_0\left(s + \frac{r}{L}\right) - i_0}{s^2 + 2\delta s + \omega_1^2 + \delta^2}, \tag{4.66}$$

gde smo označili

$$\delta = \frac{1}{2}\left(\frac{r}{L} + \frac{G}{C}\right), \tag{4.67}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_{1i}^2 - \frac{1}{4}\left(\frac{r}{L} - \frac{G}{C}\right)^2}, \tag{4.68}$$

$$\omega_{1i} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \tag{4.69}$$

Primenom (I.33) iz (4.66) se izračunava

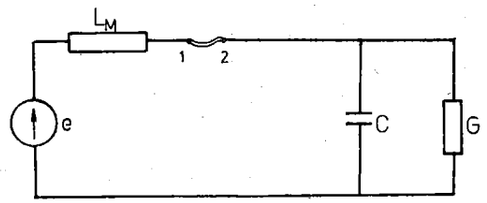
$$u_2 = \left(u_0 \cos\omega_1 t + \sqrt{\frac{L}{C}}\, i_0 \sin\omega_1 t\right) e^{-\delta t}. \tag{4.70}$$

Relacija (4.70) dobijena je uz zanemarenje uticaja r, G parametara na amplitude članova u zagradi, koji je neznatan. Prigušujući efekti gubitaka dobro se obuhvataju preko sačinioca δ.

Kod malih vrednosti C drugi član u izrazu može da i pri neznatnim strujama i_0 bude mnogo veći od prvog člana, tako da je

$$u_2 \approx \left(\sqrt{\frac{L}{C}}\, i_0 \sin\omega_1 t\right) e^{-\delta t}. \tag{4.71}$$

Relacija (4.71) pokazuje da je porast napona u_2 kod malih C prouzrokovan prelaskom energije magnetnog polja induktiviteta u energiju električnog polja kapaciteta.



Sl. 4.21

Napon u_2 može se uspostaviti sa takvom brzinom i intenzitetom da dovede do ponovnog paljenja luka između kontakata prekidača. Budući da je $L_M \ll L$, kapacitet C prazniće se praktično preko mreže, prema šemi na sl. 4.21. Sa r_e ćemo

označiti otpor luka između kontakata prekidača. Procesi pri ponovnom uspostavljanju luka u šemi na sl. 4.21 proučeni su u 3.5.1 kod analize uslova prekidanja kapacitivnih struja. Napon u_2 posle proboja u prekidaču menjaće se, saglasno (3.144) i (3.148), prema izrazu

$$u_2 \approx \sqrt{2}\, E \cos(\omega t + \psi) - \left(\sqrt{2}\, E \cos\psi - u_0'\right) e^{-\delta' t} \cos \omega_1' t. \tag{4.72}$$

U (4.72) smo označili

$$\delta' = \frac{1}{2}\left(\frac{r_e}{L_M} + \frac{G}{C}\right) \tag{4.73}$$

i

$$\omega_1' \approx \frac{1}{\sqrt{L_M C}}. \tag{4.74}$$

Ugao ψ predstavlja fazni stav napona mreže u trenutku ponovnog paljenja u prekidaču, a u_0' je vrednost napona u_2 u istom trenutku.

Struja kroz prekidač biće približno

$$i \approx i_\infty + \sqrt{\frac{C}{L_M}}\left(\sqrt{2}\, E \cos\psi - u_0'\right) e^{-\delta' t} \sin \omega_1' t + i_L'. \tag{4.75}$$

Ovde smo sa i_∞ označili stacionarnu komponentu kružne učestanosti ω koja je određena e. m. s.-om mreže i elementima šeme prema sl. 4.20. Drugi član predstavlja brzo promenljivu komponentu struje koja zbog visokih ω_1' protiče praktično samo kroz granu sa kapacitetom.

Sa i_L' označena je struja kojom se preko mreže rasterećuje induktivni element. Ova je struja približno oblika

$$i_L' = \frac{L i_0'}{L_M + L} e^{-\delta_1 t} \tag{4.76}$$

sa

$$\delta_1 = \frac{r}{L_M + L}. \tag{4.77}$$

U (4.76) i_0' predstavlja vrednost struje u induktivnom elementu u trenutku ponovnog uspostavljanja luka u prekidaču.

Kada se priguše prolazne komponente struje ponovo će, kao i na početku procesa, doći do prekidanja struje i_∞ i opisani procesi će se nastaviti istim redom — porast napona u_2, ponovno uspostavljanje luka u prekidaču, prekidanje stacionarne komponente struje, itd. Pošto se u toku procesa, usled razmicanja kontakata prekidača, povećava napon pri kome dolazi do ponovnog paljenja luka (»napon paljenja luka«), proces se neće odvijati idealno ciklički i, kod velikih vrednosti napona paljenja, on će se prekinuti.

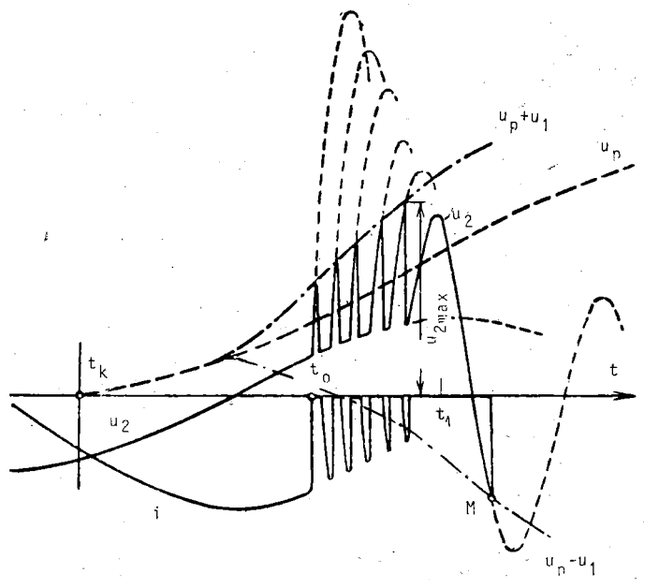
Radi dobijanja jasne vidne predstave, na sl. 4.22 prikazan je, nešto idealizovano, tok razmatranih procesa.

Na vremenskoj osi je sa t_k označen trenutak otvaranja kontakata prekidača, a sa t_0 trenutak kada je došlo do prvog prekidanja struje i kroz prekidač. Kriva u_p

predstavlja približnu vremensku promenu napona paljenja prekidača. Na slici su, kao karakteristične, nacrtane i krive $u_p + u_1$ i $u_p - u_1$. Pošto je uslov za ponovno paljenje luka u prekidaču određen relacijom

$$|u_2 - u_1| = u_p, \tag{4.78}$$

pomenute krive predstavljaju granice za maksimalno moguće vrednosti napona u_2. Prva od njih važi za slučaj kada je $u_2 > u_1$ a druga, pri $u_2 < u_1$.



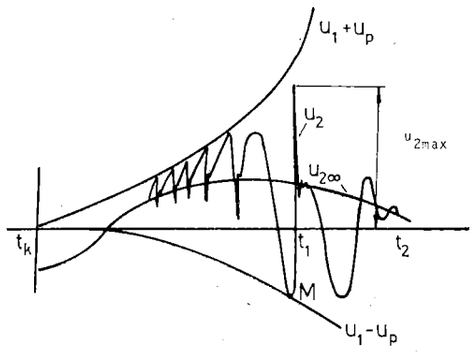
Sl. 4.22

Isprekidano izvučene krive predstavljaju tokove napona u_2 kada ne bi dolaziło do proboja u prekidaču, tzv. »prirodne« tokove u_2. Pomenuti tokovi odgovaraju relaciji (4.70).

U trenutku t_0 struja se naglo gasi i induktivni element i kapacitet odvajaju se od mreže. Napon u_2 brzo raste, u skladu sa (4.70), do trenutka kada ne dostigne graničnu krivu pri kojoj se ponovo pali luk u prekidaču. Posle paljenja luka napon u_2 dobija praktično istu vrednost kao napon u_1, koji je približno jednak e. m. s. mreže. Posle izvesne pauze, potrebne da struja i dostigne stacionarnu vrednost, ova se struja ponovo gasi i napon u_2 opet naglo raste.

Zbog višestrukog uzastopnog ponavljanja razmatranih procesa kriva napona u_2 dobija testerasti oblik sa postepeno narastajućim amplitudama, usled porasta napona u_p. Prirodne amplitude i brzina promene napona u_2 smanjuju se tokom procesa zbog povećanja otpora električnog luka i smanjivanja struje induktivnog elementa, tako da će u određenom trenutku maksimalna pozitivna vrednost napona u_2 biti ispod gornje granične krive i luk se neće ponovo upaliti (trenutak t_1). Do paljenja luka može pri tom da dođe kod negativnih vrednosti napona u_2, ako ove dostignu krivu $u_p - u_1$ (tačka M).

Preglednosti radi na sl. 4.22 nisu prikazani tokovi visokofrekventnih procesa pri ponovnim paljenjima luka u prekidaču, opisani relacijama (4.72) i (4.75). Zbog navedenih pojava napon u_2 neće se posle ponovnih paljenja luka odmah vratiti na novu stacionarnu vrednost u_1, kako je pokazano na sl. 4.22, već preko oscilatornog procesa koji može da prouzrokuje dodatne prenapone. Stvarni tok napona u_2 prikazan je na sl. 4.23. Kako se vidi, opasno visoke prenapone usled oscilatornih pojava uzrokuje ponovno paljenje kod negativnog polutalasa napona u_2, kada se imaju najveće razlike između trenutne vrednosti napona u_2 (tačka M) i njegove stacionarne vrednosti posle paljenja luka $u_{2\infty} \approx u_1\,(t_1)$. Razmatrana pojava poznata je već iz analize ponovnih paljenja, izvedene u 3.5.1.



Sl. 4.23

Treba takođe imati u vidu da ni prekidanje struje i nije trenutno, kako je prikazano na sl. 4.22, već oscilatorno sa prigušenjem. Brzina prekidanja struje i vrednosti struje pri kojima može doći do prekidanja jako zavise od tipa i karaktera prekidača. Pogonska iskustva [69, 19] pokazuju da kod savremenih prekidača do prekidanja može doći kod struja reda 10 i, ređe, 20 A. Naglom prekidanju struja pre prolaska kroz nulte vrednosti skloni su pneumatski prekidači. Pomenuta pojava je kod uljnih i malouljnih prekidača retka i manje izrazita.

Takođe treba uočiti da brzina uspostavljanja dielektričke čvrstoće prekidača neposredno utiče na visinu prenapona na induktivnom elementu. Iz dijagrama na sl. 4.22 i sl. 4.23 vidi se da su pomenuti prenaponi veći kod prekidača sa bržim porastom napona paljenja. Kod ovakvih prekidača, međutim, brže dolazi do definitivnog prekidanja struje.

4.4.2. PREKIDANJE STRUJA ZEMLJOSPOJA

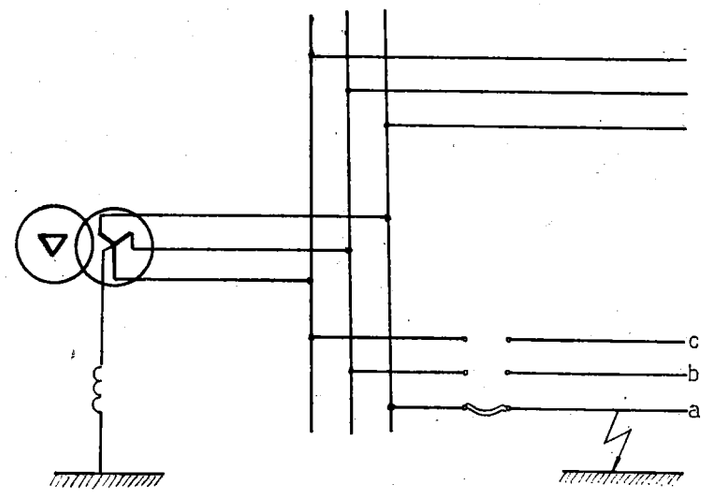
Do pojava razmatranih u prethodnom odeljku može da dođe pri isključivanju bilo kog induktivnog elementa sa mreže, kada se ovaj odvaja od vodova tako da se mora prazniti preko malih kapaciteta veza i drugih elemenata postrojenja. Navedene okolnosti imaju se, na primer, pri isključivanju transformatora u praznom hodu.

Razmatrane pojave u kompenzovanim mrežama mogu, zbog postojanja prigušnice, nastati i kod isključivanja zemljospojeva bilo koje vrste, u slučaju nepovoljne konfiguracije mreže.

Pretpostavimo da je na fazi »*a*« voda 1 na sl. 4.24 došlo do jednofaznog zemljospoja. Neka su kod isključivanja zemljospoja prvo prekinute struje u ispravnim fazama. Ekvivalentna električna šema za komutaciju faze »*a*« u navedenim uslovima prikazana je na sl. 4.25. Iz šeme su jednostavnosti radi izostavljene induktivnosti transformatora. Sa C_0 označeni su nulti kapaciteti ostalog dela mreže, koji će se imati na strani prigušnice posle odvajanja neispravnog voda.

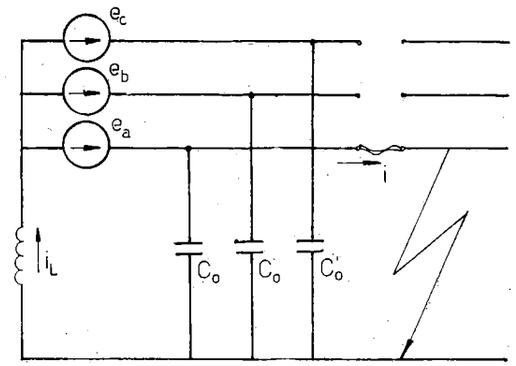
Ako je mreža pre isključenja bila potpuno kompenzovana, struja i imaće induktivni karakter i menjaće se praktično u fazi sa strujom i_L. U slučaju da usled

nesavršenosti prekidača do prekidanja struje i dođe pri nenultim vrednostima, u prigušnici će se zateći takođe neka vrednost struje $i_0 \neq 0$ i odgovarajuća magnetna



Sl. 4.24

energija. Usled pražnjenja pomenute energije preko kapaciteta C_0 na ovima će se pojaviti brzo promenljive komponente napona koje će se superponirati na e. m. s. mreže i dovesti do manjih ili većih prenapona zavisno od vrednosti kapaciteta C_0, kako to pokazuju relacije (4.70) odnosno (4.71). Pomenuti prenaponi biće naročito osetni u slučaju kada sem voda u kvaru nema drugih vodova, tako da su



Sl. 4.25

C_0 samo kapaciteti elemenata postrojenja. Prenaponi na fazama na strani prigušnice mogu da dovedu do ponovnog paljenja luka u prekidaču i do ponovnog uspostavljanja zemljospoja.

Naročito opasni prenaponi mogu se pojaviti pri isključenju dvostrukih zemljospojeva i drugih složenih zemljospojeva. Kako bi se moglo pokazati na osnovu relacija izvedenih u 1.3, struja kroz prigušnicu u slučaju dvostrukog zemljospoja pomerena je fazno približno za četvrtinu periode prema struji kroz provodnike faza u kvaru. Iz navedenog proizilazi da u momentu prekidanja struja kvara, u prigušnici može da bude zatečena znatna energija, koja će dovesti do prenapona. Do razmatranih procesa kod dvostrukih zemljospojeva dolazi, znači, i kod prekidača koji nisu skloni prekidanju struja pri nenultim vrednostima.

Prenaponi opisane vrste mogu se ograničiti primenom odvodnika prenapona, podesnim izborom redosleda operacija i korišćenjem prekidača čiji se intenzitet prekidanja prilagođava vrednostima struja, kakvi su uljni i malouljni prekidači, ili prekidači sa ugrađenim otpornicima za premošćenje kontakata.

Odvodnici prenapona stavljaju se obično paralelno kompenzacionoj prigušnici. U razmatranim procesima odvodnici treba približno da apsorbuju svu energiju magnetnog polja prigušnice, tako da se propusna moć odvodnika određuje iz uslova

$$W \geqslant \frac{1}{2} L_p i_0^2. \tag{4.79}$$

S obzirom na red vrednosti energije koje se obično imaju u praktičnim okolnostima, u opisanu svrhu moći će se po pravilu koristiti standardni odvodnici prenapona.

Kako su prethodna razmatranja pokazala, naročito nepovoljni tok procesa može se očekivati kod prekidanja zemljospojeva kada posle isključivanja kvara za postrojenje sa prigušnicom ne ostaje vezan nijedan vod. VDE propisi, primera radi, u navedenim slučajevima preporučuju isključenje transformatora na strani napojne mreže, tako da prigušnica ostaje u kolu sa vodom [19].

4.5. KOMPENZACIONE PRIGUŠNICE

Prigušnice se izvode sa magnetnim jezgrom koje ima povećano međugvožđe da bi se postigla linearna zavisnost napona i struje i smanjio sadržaj viših harmonika u dijagramu struje, koji bi mogli da pogoršaju uslove gašenja struje zemljospoja. Osetnija nelinearnost prigušnice, koja bi se imala kada bi magnetno kolo bilo potpuno zatvoreno kao kod transformatora, otežala bi regulaciju prigušnice. Svaka i manja promena napona u neutralnoj tački u režimu sa jednofaznim zemljospojem, do kojih inače dolazi u pogonskim uslovima, prouzrokovala bi osetnije promene struje prigušnice i tako narušavala podešeni stepen kompenzacije.

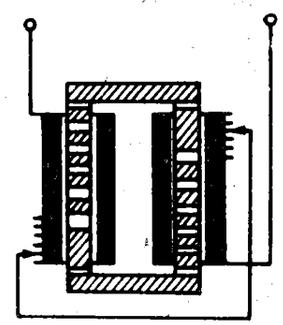
Na sl. 4.26 prikazan je poprečni presek jedne kompenzacione prigušnice sa cilindričnim namotajem i otcepima za regulaciju. Prigušnica se smešta u sud sa uljem. Stepen kompenzacije podešava se promenom otcepa. Pomenuta regulacija može se izvoditi samo kada prigušnica nije opterećena, tj. kada mreža nije u zemljospoju.

Kako se vidi, na pokazanoj klasičnoj konstrukciji međugvožđe je povećano sekcioniranjem jezgara magnetnog kola u više segmenata.

Opseg regulacije prigušnice određuje se odnosom

$$r = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}, \tag{4.80}$$

gde $I_{\min}$ i $I_{\max}$ predstavljaju minimalnu i maksimalnu struju prigušnice koje se mogu postići pri nazivnom naponu, respektivno. Struja $I_{\min}$, očigledno, određuje maksimalnu, a struja $I_{\max}$ minimalnu vrednost reaktanse (impedanse) prigušnice, koja se može podesiti regulacijom.



Sl. 4.26

Struja $I_{\max}$ ujedno predstavlja i nazivnu struju prigušnice

$$I_{np} = I_{\max}. \tag{4.81}$$

Nazivni napon prigušnice određuje se prema nazivnom faznom naponu mreže, budući da prigušnica u pogonu sa jednofaznim zemljospojem dolazi na fazni napon (Odeljak 4.1)

$$U_{np} = U_{nf}. \tag{4.82}$$

Nazivna snaga prigušnice definiše se kao

$$S_{np} = U_{np} I_{np}. \tag{4.83}$$

Regulacija prigušnice može biti stupnjevita i ravnomerna. U oba slučaja ona se može izvoditi ručno ili automatski.

Stupnjevita regulacija ostvaruje se preko otcepa — »izvoda«, kako je pokazano na sl. 4.26. Broj otcepa razlikuje se kod pojedinih konstrukcija i obično se nalazi u opsegu 3÷16. Najčešće se primenjuju prigušnice sa 5, 6 i 9 otcepa. Promena otcepa izvodi se preko uređaja za preključivanje. Poluga za pokretanje pomenutog uređaja nalazi se na poklopcu suda i može se spregnuti sa odgovarajućim pogonom za daljinsko upravljanje.

Ravnomerna regulacija prigušnice ostvaruje se preko promene međugvožđa ili dodatnim magnećenjem magnetnog kola jednosmernom strujom.

Podešavanje prigušnice na tačnu kompenzaciju izvodi se obično prema vrednostima napona u neutralnoj tački u normalnom pogonu mreže koje se uspostav ljaju usled asimetrije mreže (Tačka 4.1.2). Tačna kompenzacija postiže se, kako se vidi iz (4.22) i (4.23), onda kada pomenuti napon ima najveću vrednost za datu konfiguraciju mreže. Da bi se dobili dovoljno veliki signali za regulaciju, kod kablovskih mreža se često veštački povećava asimetrija prema zemlji ugradnjom kondenzatora.

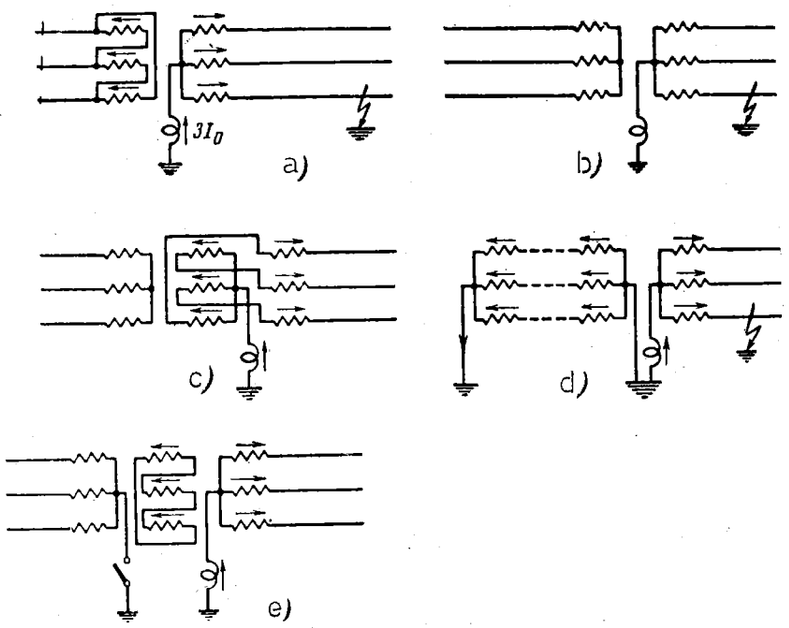
Tipične vrednosti opsega r kod prigušnica sa stupnjevitom regulacijom su 1/2 ili 1/2,5. Kod kontinualne regulacije postižu se znatno širi opsezi, čak reda 1/10.

Nazivne snage prigušnica obično leže između 50÷1500 kVA. U ČSSR se, međutim, za mreže 35 kV rade prigušnice i snage 5000 kVA, sa ravnomernom regulacijom.

Kod mreža sa vrlo velikim strujama zemljospoja može se pokazati opravdanom ugradnja više prigušnica. U ovakvim slučajevima obično je samo jedna prigušnica regulaciona a ostale rade sa blokiranom regulacijom ili su izvedene bez otcepa.

Kod rasporeda prigušnica u mreži treba voditi računa o spregama i nazivnim snagama transformatora kod kojih se priključuju, a i o mogućim uklopnim stanjima mreže kako se ne bi isključivli delovi mreže sa nekom od prigušnica.

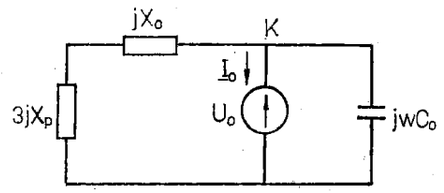
Na sl. 4.27 prikazani su mogući načini priključivanja prigušnica.



Sl. 4.27

Na slici je prikazana raspodela nultih komponenti struja za slučaj jednofaznih zemljospojeva u mreži sa prigušnicom.

Ekvivalentna šema za nulti redosled za sve razmatrane slučajeve je istog opšteg oblika i prikazana je na sl. 4.28. Iz šeme su, jednostavnosti radi, izostavljene aktivne otpornosti i odvodnosti.



Sl. 4.28

Parametar X_0 predstavlja nultu reaktansu napojne mreže i transformatora, a C_0 nulti kapacitet mreže na strani prigušnice.

Za slučaj a) sa sl. 4.27, X_0 je jednako reaktansi rasipanja transformatora i ima zanemarljivo malu vrednost prema reaktanski prigušnice. Zato se pri pojavi

jednofaznog zemljospoja, na prigušnici uspostavlja ceo napon U_0 koji je praktično jednak nazivnom faznom naponu mreže. Budući da se otcepi na prigušnici biraju uz pretpostavku da će se kod zemljospoja imati nazivni fazni napon, učinjeni izbor u razmatranom slučaju daće željene vrednosti struje prigušnice. S druge strane, nulte komponente struja koje usled zemljospoja teku kroz namotaj transformatora sa prigušnicom uzrokuju odgovarajuće struje u drugom namotaju vezanom u trougao, koje neutrališu njihovo dejstvo u magnetnom kolu transformatora. Tako ne dolazi do dodatnog zagrevanja magnetnog kola i suda transformatora.

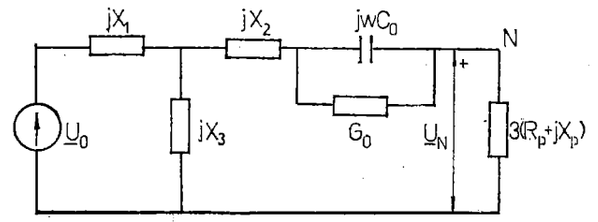
U slučaju b) parametar X_0 je praktično jednak reaktansi magnećenja transformatora za nulti redosled i može da bude reda vrednosti reaktanse prigušnice. Ovo otežava podešavanje kompenzacije a i uslove rada transformatora, pošto magnetno delovanje nultih komponenti struja kroz namotaj sa prigušnicom nije suzbijeno. Ako se priključenje na razmatrani način ne može izbeći, obično se zahteva da nazivna snaga transformatora bude bar 4 do 5 puta veća od snage prigušnice.

Kod priključenja prema slici 4.27 c) X_0 je jednako polovini reaktanse kratkog spoja transformatora tako da nikakvih smetnji sa stanovišta podešenja kompenzacije nema. Kako se vidi sa slike, nulte komponente struja usled zemljospoja imaju oprečne smerove u polunamotima svake faze, tako da se u pogledu magnetnog dejstva poništavaju.

Sprega *Y Y* kao na sl. 4.27 d) retko se primenjuje, pošto omogućava prenošenje poremećaja pri zemljospojevima iz jedne u drugu mrežu, kao i stvaranje viših harmonika.

Umesto sprege d) u praksi se obično krosti sprega e) u kojoj pored namotaja vezanih u zvezdu postoji i treći namotaj vezan u trougao. Pomenuti namotaj može da bude dimenzionisan kao radni, predviđen za opterećivanje u normalnom pogonu, ili samo kao pomoćni, »kompenzacioni«, da ispravi ranije pomenute nedostatke sprege d). Namotaj vezan u trougao u pogledu proticanja nultih komponenti struja ponaša se kao odgovarajući namotaj u slučaju a).

U slučajevima d) i e) može pri zemljospojevima u napojnoj mreži da dođe do povišenja napona neutralne tačke kompenzovane mreže zbog prenošenja napona nultog redosleda. Pretpostavlja se da je u slučaju e) uzemljena neutralna tačka transformatora na strani napojne mreže.



Sl. 4.29

Ekvivalentna nulta šema mreža u razmatranim uslovima, koja je istog oblika za obe navedene transformacije, prikazana je na sl. 4.29.

Tačka K označava mesto zemljospoja u napojnoj mreži a tačka N neutralnu tačku u kojoj je priključena kompenzaciona prigušnica. Parametar X_1 predstavlja reaktansu dela napojne mreže od mesta kvara do transformatora zajedno sa odgovarajućom rednom reaktansom u zamenskoj šemi transformatora. Sa X_2 označena je takođe odgovarajuća redna reaktansa u zamenskoj šemi transformatora. Parametar X_3 u slučaju d) predstavlja reaktansu magnećenja transformatora, a u slučaju e) rednu reaktansu trećeg namotaja. Sa $\underline{U}_0$ označena je nulta komponenta napona na mestu kvara koja zavisi, kao što je poznato, od vrste kvara i vrednosti impedansi mreže za mesto kvara (Poglavlje 1).

Iz priložene šeme se izračunava

$$U_N = \frac{U_0}{1+\frac{X_1}{X_3}} \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{G_0}{3\,X_p(\omega\,C_0)^2}+\frac{R_p}{X_p}\right]^2+\left(\frac{X_2}{3\,X_p}+1-\frac{1}{3\,X_p\,\omega\,C_0}\right)^2}}. \tag{4.84}$$

Ako se u članu pod korenom koji obuhvata uticaj aktivnih otpornosti i odvodnosti učini pretpostavka

$$3\,X_p\,\omega\,C_0 \approx 1, \tag{4.85}$$

što odgovara potpunoj kompenzaciji i zanemari mali parametar $X_2/(3\,X_p)$, dobija se, u skladu sa (4.12) i (4.13),

$$U_N = \frac{U_0}{1+\frac{X_1}{X_3}} \frac{1}{\sqrt{\delta^2+\nu^2}}. \tag{4.86}$$

Pošto prvi član u (4.86) predstavlja praktično napon u neutralnoj tački koji bi se imao kada bi mreža bila izolovana, to je dobijena formula u saglasnosti sa ranije izvedenim opštim izrazom (4.22).

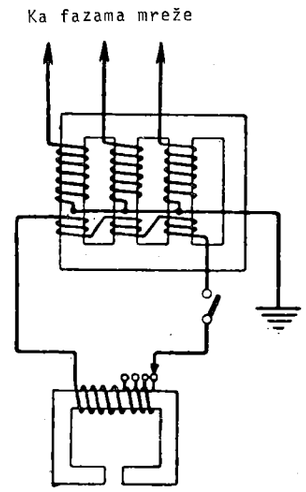
Formula (4.86) pokazuje da se u neutralnoj tački mogu kod razmatranih zemljospojeva pojaviti osetni naponi ako je mreža tačno kompenzovana. U ovom pogledu znatno je manje kritična sprega e) koja se odlikuje niskim vrednostima reaktanse X_3 (ova je reda vrednosti X_1) što, prema (4.86), neposredno smanjuje napon U_N.

Reaktansa X_3 za slučaj d) neuporedivo je veća od X_1 tako da praktično ne utiče na vrednost napona koji se pojavljuje u neutralnoj tački.

Nazivna snaga prigušnica, kada se ove priključuju prema šemama a), c) i eventualno d), ne sme da bude veća od 50% nazivne snage tranfsormatora, a kod šeme e), od nazivne snage namotaja vezanog u trougao [69]. Pri tom se polazi od pretpostavke da rad sa zemljospojem neće trajati duže od 2 h.

Kompenzacija struje zemljospoja može se u principu ostvariti i bez ugradnje prigušnica u neutralnoj tački transformatora, primenom »Bauhovog (Bauch) transformatora« (sl. 4.30). Bauhov transformator ima trofazni primarni namotaj vezan u zvezdu koja je direktno uzemljena. Sekundarni namotaj spregnut je u otvoren trougao sa čijih krajeva se napaja kompenzaciona prigušnica. Magnetno kolo je urađeno sa dodatnim povratnim jezgrom za zatvaranje flukseva nultog redosleda. U normalnom pogonu između krajeva trougla neće biti napona, tako da će transformator raditi u praznom hodu.

Bauhov transformator može se ugraditi u mrežu na svakom željenom mestu, nezavisno od sprega postojećih transformatora. Pomenuto rešenje ipak se retko



Sl. 4.30

primenjuje pošto je složenije i skuplje, kako zbog investicionih troškova, tako i zbog potrošnje energije u normalnom pogonu, potrebne za pokrivanje gubitaka praznog hoda.

5. UZEMLJENJE PREKO MALE IMPEDANSE

Ako se neutralna tačka napojnog transformatora uzemlji preko male impedanse mogu se ograničiti prelazni prenaponi pri nastanku jednofaznih zemljospojeva. Povećana struja zemljospoja obezbeđuje, takođe, stabilan električni luk na mestu kvara, čime se onemogućava pojava intermitentnih prenapona. Povećane vrednosti struje olakšavaju otkrivanje kvara i pojednostavljuju zaštitu, ali zahtevaju automatsko isključenje svakog jednofaznog zemljospoja, isto kao i bilo kog drugog kvara. Zbog većih vrednosti struje zemljospojeva, otežavaju se uslovi uzemljenja. Takođe se mora voditi računa i o opasnim naponima koji se mogu pojaviti na paralelno vođenim telekomunikacionim vodovima.

Uzemljenje može biti izvedeno preko otpornika, metalnog ili elektrolitskog, ili preko reaktanse. Uzemljenje preko reaktanse ostvaruje se vezivanjem prigušnice u neutralnu tačku napojnog transformatora, ili, ako ova ne postoji, posredstvom transformatora za uzemljenje. Direktno uzemljenje može se smatrati posebnim slučajem uzemljenja preko reaktanse u kome ulogu reaktanse uzemljenja ima nulta reaktansa napojnog transformatora.

5.1. STACIONARNE VREDNOSTI STRUJA I NAPONA PRI JEDNOFAZNOM ZEMLJOSPOJU

5.1.1. IMPEDANSE MREŽE ZA α I 0 REDOSLED

Pretpostavimo da je na kraju jednog od vodova mreže na sl. 5.1, na fazi »*a*«, došlo do jednofaznog zemljospoja. Mreža je uzemljena preko male impedanse $\underline{Z}_N$.

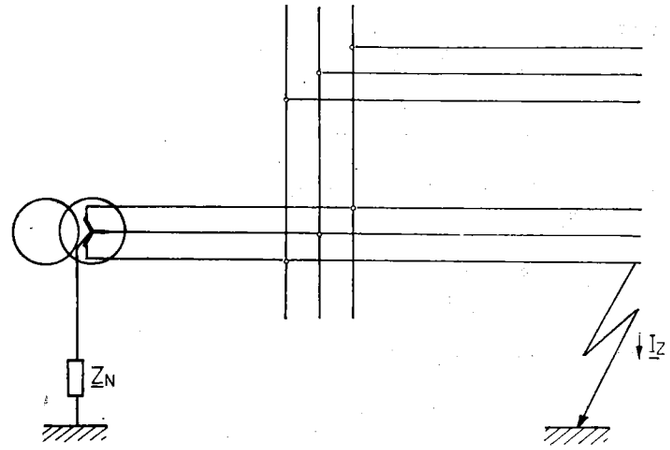
Impedansa za α redosled na mestu kvara jednaka je približno, kada se zanemari otpor luka zemljospoja, kako je pokazano u 3.2,

$$\underline{Z}_\alpha \approx j\,X + \underline{Z}_2. \tag{5.1}$$

U (5.1) je sa X označena reaktansa napojne mreže i transformatora, a sa $\underline{Z}_2$ pogonska redna impedansa voda u zemljospoju, računato od napojnih sabirnica do mesta kvara.

Šema nultih impedansi mreže u posmatranom slučaju prikazana je na sl. 5.2. Parametri u šemi imaju isto značenje kao na sl. 4.2.

Ostali parametri u šemi imaju značenje kao u Odeljku 4.1.

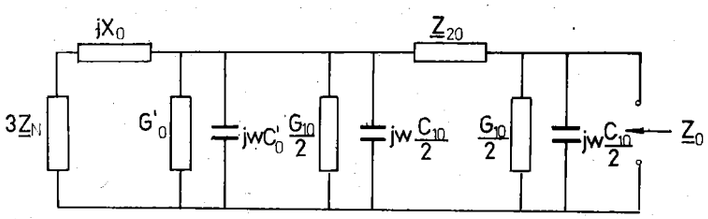


Sl. 5.1

Pošto je po pravilu

$$Z_{20} \ll \frac{2}{|G_{10} + j\,\omega\,C_{10}|}, \tag{5.2}$$

sve otočne admitanse u šemi na sl. 5.2 mogu se vezati paralelno. Admitansa dobijena sabiranjem pomenutih parcijalnih admitansi, označimo je sa $G_0 + j\,\omega\,C_0$, daje ukupnu aktivnu odnosno kapacitivnu odvodnost vodova mreže za nulti redosled.



Sl. 5.2

Posle učinjenog uprošćenja, iz šeme na sl. 5.2. izračunava se da je nulta impedansa za mesto kvara

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{20} + \frac{3\,\underline{Z}_N + j\,X_0}{(3\,\underline{Z}_N + j\,X_0)\,(G_0 + j\,\omega\,C_0) + 1} \tag{5.3}$$

ili

$$\underline{Z}_0 \approx \underline{Z}_{20} + \frac{3\,\underline{Z}_N + j\,X_0}{3\,\underline{Z}_N j\,\omega\,C_0 + 1}. \tag{5.4}$$

U većini praktičnih slučajeva je

$$3\,\omega\,C_0\,Z_N \ll 1, \tag{5.5}$$

tako da se ima

$$\underline{Z}_0 \approx \underline{Z}_{20} + 3\,\underline{Z}_N + j\,X_0. \tag{5.6}$$

5.1.2. STRUJA JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA

Kada se u opštu formulu (1.72) uvrste impedanse $\underline{Z}_\alpha$ i $\underline{Z}_0$ prema (5.1) i (5.6), za struju zemljospoja se dobija

$$\underline{I}_z = \frac{3\,U_{ra}}{3\,\underline{Z}_N + j(2\,X + X_0) + 2\,\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{20}}. \tag{5.7}$$

Izrazu (5.7) može se dati oblik

$$\underline{I}_z = \underline{\mu}\,\underline{I}_{z0}, \tag{5.8}$$

gde smo označili

$$\underline{I}_{z0} = \frac{U_{nf}}{\underline{Z}_N}, \tag{5.9}$$

$$\underline{\mu} = \frac{U_{ra}}{U_{nf}}\left(1 + j\,\frac{2\,X + X_0}{3\,\underline{Z}_N} + \frac{2\,\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{20}}{3\,\underline{Z}_N}\right)^{-1}. \tag{5.10}$$

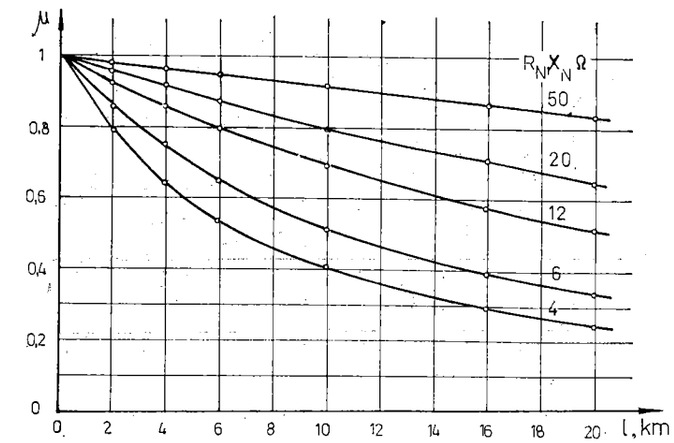
Prema definiciji (5.9), $\underline{I}_{z0}$ predstavlja struju jednofaznog zemljospoja koja bi se imala kada bi se kvar dogodio na početku voda pri $U_{ra}=U_{nf}$ i kada bi reaktanse napojne mreže i transformatora bile zanemarljivo male u poređenju sa impedansom uzemljenja, što je najčešće slučaj.

Sačiniocem $\underline{\mu}$ obuhvata se uticaj pojedinih parametara mreže na vrednosti struje zemljospoja. U praktičnim slučajevima obično je najznačajniji uticaj impedansi voda koje mogu da imaju osetne vrednosti kada je mesto kvara udaljeno od napojne *TS*. Uticaj reaktansi mreže i transformatora može da se ispolji u slučajevima kada se mreža uzemljuje preko impedansi vrlo malih vrednosti.

Vrednosti parametra $\underline{\mu}$ u karakterističnim slučajevima prikazane su kao funkcije dužine voda do mesta kvara na sl. 5.3 do 5.5. Krive su izračunate na osnovu (5.10) uz zanemarenje uticaja reaktansi napojne mreže i transformatora, za $U_{ra}=U_{nf}$. Dijagram na sl. 5.3 dobijen je za kablove 35 kV preseka Cu-95 mm² sa olovnim plaštem koji imaju impedanse $\underline{Z}_2=(0{,}2+j\,0{,}1)\ \Omega/\text{km}$ i $\underline{Z}_{20}=(1+j\,1{,}2)\ \Omega/\text{km}$. Pošto rezultantna impedansa $2\,\underline{Z}_2+\underline{Z}_{20}$ za razmatrane kablove ima praktično jednak realni i imaginarni deo, parametar $\underline{\mu}$ biće isti za mreže uzemljene preko otpornika ili preko reaktanse. Zbog toga se dijagram na sl. 5.3 može koristiti i kod mreža uzemljenih preko reaktanse.

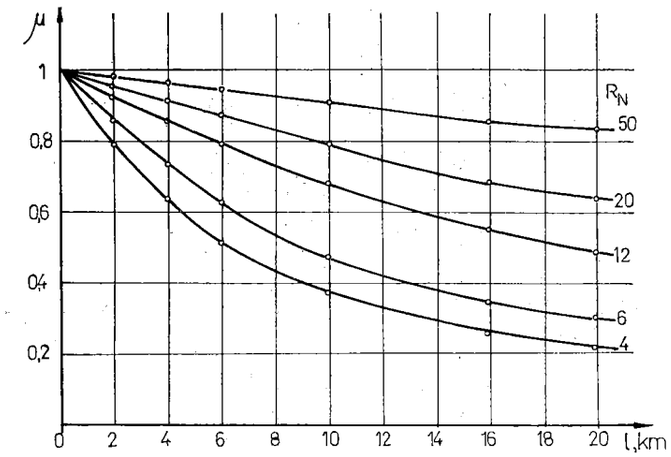
Kod kablova 10 kV tipa IPO 13 i kablova sa plastičnom izolacijom i bakarnim plaštom 25 mm², za isti presek provodnika nulta otpornost približno je dva puta veća od vrednosti usvojene za kablove 35 kV. Sačinilac $\underline{\mu}$ za pomenute kablove kod uzemljenja preko otpornika može se sa zadovoljavajućom tačnošću takođe

odrediti uz pomoć dijagrama na sl. 5.3 ako se koriste krive za približno dvostruko manje vrednosti otpornosti R_N. Ako je, primera radi, mreža 10 kV uzemljena preko otpornika od 20 Ω, vrednost sačinioca $\underline{\mu}$ procenjuje se prema krivoj za $R_N=12\ \Omega$, u slučaju da se ima otpornik od 12 Ω, prema krivoj za $R_N=6\ \Omega$ itd.



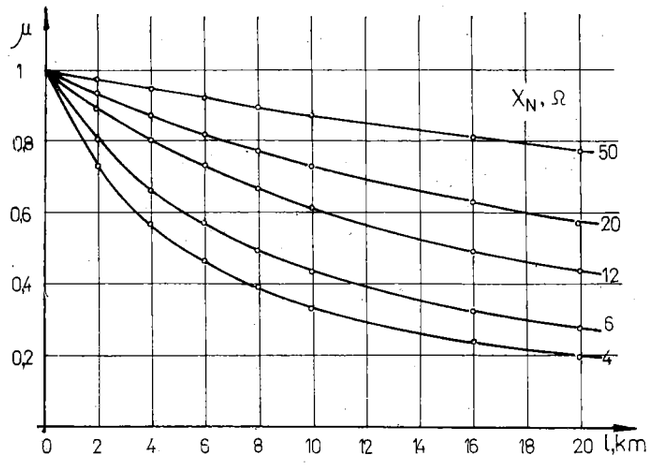
Sl. 5.3

Dijagrami na sl. 5.4 i sl. 5.5 nacrtani su za vazdušne vodove sa provodnicima Alučel 6 : 1 preseka 70/12 mm².



Sl. 5.4

Kod direktno uzemljenih mreža struja jednofaznog zemljospoja dobija se iz (5.7) kada se uvrsti $Z_N=0$.



Sl. 5.5

5.1.3. NAPONI ISPRAVNIH FAZA

Stacionarne vrednosti napona ispravnih faza »b« i »c« pri zemljospoju faze »a« izračunavaju se preko opštih izraza (1.75) i (1.77), kada se u ove uvrste odgovarajuće impedanse $\underline{Z}_\alpha$ i $\underline{Z}_0$.

Ako, jednostavnosti radi, pretpostavimo da je do kvara došlo na sabirnicama napojnog transformatora i da su reaktanse X i X_0 približno jednake, prema (5.1) i (5.6) će biti

$$\underline{Z}_\alpha \approx j\,X$$
$$\underline{Z}_0 \approx 3\,\underline{Z}_N + j\,X. \tag{5.11}$$

S obzirom na (5.11), iz (1.75) i (1.77) se dobija

$$\underline{U}_b = \left(e^{-j\frac{2\pi}{3}} - \frac{\underline{Z}_N}{\underline{Z}_N + j\,X}\right)\underline{U}_{ra} \tag{5.12}$$

$$\underline{U}_c = \left(e^{j\frac{2\pi}{3}} - \frac{\underline{Z}_N}{\underline{Z}_N + j\,X}\right)\underline{U}_{ra}. \tag{5.13}$$

Na osnovu (5.12) i (5.13) dolazi se do izraza za faktore stacionarnih prenapona ispravnih faza

$$k_b = \frac{U_b}{U_{ra}} = \left| e^{-j\frac{2\pi}{3}} - \frac{\underline{Z}_N}{\underline{Z}_N + j\,X} \right|, \tag{5.14}$$

$$k_c = \frac{U_c}{U_{ra}} = \left| e^{j\frac{2\pi}{3}} - \frac{\underline{Z}_N}{\underline{Z}_N + j\,X} \right|. \tag{5.15}$$

Za slučaj uzemljenja preko otpornosti $\underline{Z}_N = R_N$, iz opštih formula (5.14) i (5.15) dobijaju se, posle jednostavnih transformacija, sledeći izrazi za faktore prenapona

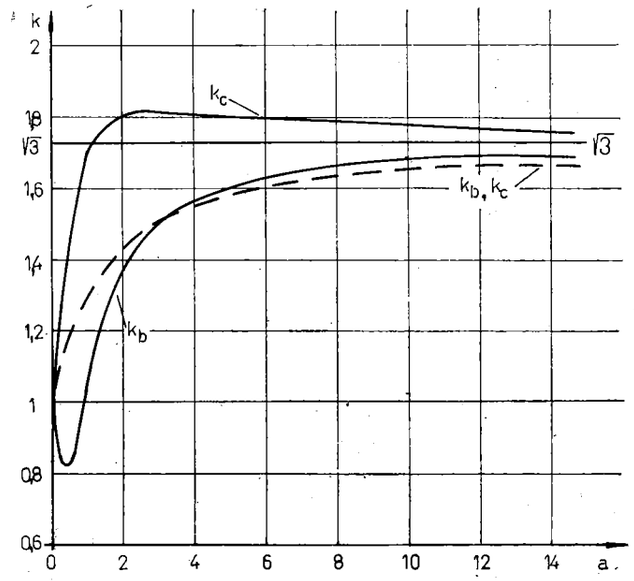
$$k_b = \sqrt{\frac{3\,a^2 - \sqrt{3}\,a + 1}{a^2 + 1}} \tag{5.16}$$

$$k_c = \sqrt{\frac{3\,a^2 + \sqrt{3}\,a + 1}{a^2 + 1}}. \tag{5.17}$$

Ovde smo označili $a = R_N/X$.

Kako se vidi iz izvedenih izraza, faktori prenapona za obe ispravne faze zavise od odnosa R_N i X a ne od samih vrednosti pomenutih parametara.

Zavisnosti (5.16) i (5.17) prikazane su grafički, u vidu dijagrama, na sl. 5.6.



Sl. 5.6

Priloženi dijagrami pokazuju da faktor k_c može da iznosi i reda 1,82 što vrednost $\sqrt{3}$, koja odgovara međufaznom radnom (nazivnom) naponu, premašuje za 5,2%. Navedenu maksimalnu vrednost faktor k_c ima kada je

$$a = \frac{\sqrt{7}+2}{\sqrt{3}} \approx 2{,}67$$

odnosno

$$R_N = 2{,}67\,X. \tag{5.18}$$

Treba takođe uočiti da do previšenja međufaznog napona dolazi kada je

$$a=\frac{R_N}{X}>1{,}2. \tag{5.19}$$

O razmatranoj pojavi treba voditi računa pri izboru odvodnika prenapona. U odnosu na izolaciju mreže analizirani prenapon ne predstavlja nikakvu opasnost, pošto se zemljospoj brzo isključuje.

Kako dijagrami na sl. 5.6 pokazuju, faktor prenapona faze »b«, koji u režimu koji prethodi kvaru fazno zaostaje za naponom pogođene faze, ima uvek vrednosti manje od 1,73. Minimalna vrednost $k_b=0{,}82$ dostiže se pri

$$a=\frac{\sqrt{7}-2}{\sqrt{3}}\approx 0{,}37.$$

Kod mreža uzemljenih preko reaktanse, $\underline{Z}_N=j\,X_N$, iz (5.14) i (5.15) se dobija

$$k_b=k_c=\frac{\sqrt{3\,a^2+3\,a+1}}{a+1}, \tag{5.21}$$

gde je označeno $a=X_N/X$.

Faktori prenapona na ispravnim fazama u razmatranom slučaju uvek su manji od 1,73 a ovoj vrednosti teže tek kod velikih odnosa X_N/X, kada se mreža više ne može smatrati uzemljenom preko male impedanse. Zavisnost (5.21) prikazana je na sl. 5.6 isprekidano izvučenom krivom.

Kod direktno uzemljenih mreža je $a=0$ čemu odgovaraju vrednosti

$$k_b=k_c=1. \tag{5.22}$$

5.2. PRELAZNI PRENAPONI PRI NASTANKU JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA

5.2.1. KARAKTERISTIČNI PARAMETRI

Analiziraćemo slučaj nastanka jednofaznog zemljospoja faze »a« na sabirnicama napojnog transformatora na sl. 5.1. Distributivna mreža biće obuhvaćena samo preko G, C parametara vodova za odgovarajuće redoslede. Ovakva analiza ukazuje na osnovne tokove pojava i omogućava procenu uticaja svih bitnih parametara.

Naponi ispravnih faza kod nastanka jednofaznog zemljospoja određeni su opštim relacijama (1.25) do (1.29), koje se mogu napisati u obliku

$$\tilde{u}_b=\tilde{u}_{rb}+\frac{\tilde{A}-1}{2\,\tilde{A}+1}\,\tilde{u}_{ra} \tag{5.22}$$

$$\tilde{u}_c=\tilde{u}_{rc}+\frac{\tilde{A}-1}{2\,\tilde{A}+1}\,\tilde{u}_{ra}, \tag{5.23}$$

gde je označeno

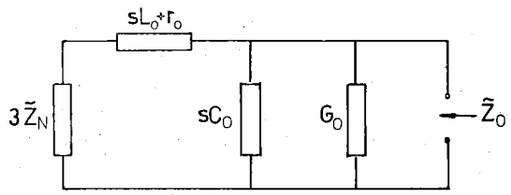
$$\tilde{A}=\frac{\tilde{Z}_\alpha}{\tilde{Z}_0}. \tag{5.24}$$

Zamenska šema mreže za α redosled poklapa se u svemu sa odgovarajućom šemom za izolovanu mrežu na sl. 3.8, pošto na nju ne utiče impedansa u neutralnoj tački. Za $\tilde{Z}_\alpha$ važiće stoga, i u razmatranom slučaju izraz (3.57).

Ekvivalentna šema za nulti redosled prikazana je na sl. 5.7. Šema sadrži granu sa impedansom uzemljenja, $\tilde{Z}_N=R_N+sL_N$ i induktivnošću i otpornošću napojnog transformatora i mreže za nulti redosled, L_0, r_0.

Iz šeme na sl. 5.7 se izračunava

$$\tilde{Z}_0=\frac{sL_{e0}+r_{e0}}{s^2L_{e0}\,C_0+s\,(L_{e0}\,G_0+r_{e0}\,C_0)+r_{e0}\,G_0+1}. \tag{5.25}$$



Sl. 5.7

U (5.25) L_{e0} i r_{e0} su ekvivalentna induktivnost i otpornost grane sa impedansom uzemljenja

$$L_{e0}=L_0+3\,L_N, \tag{5.26}$$

$$r_{e0}=r_0+3\,R_N. \tag{5.27}$$

Pošto se, posle sređivanja, u (5.22) i (5.23) u imeniocima operatorskih izraza javljaju polinomi trećeg stepena, za napone u_b i u_c ne mogu se naći podesni opšti izrazi u vremenskom domenu.

Operatorske relacije (5.22) i (5.23) mogu, međutim, poslužiti za procenu parametara koji najviše utiču na tokove napona ispravnih faza. Maksimalne vrednosti ovih napona mogu se zatim ustanoviti nizom numeričkih proračuna ili eksperimetima na modelima mreže, u kojima bi se za uočene karakteristične parametre usvajale različite vrednosti iz praktično mogućih opsega [10, 71].

Kako se vidi iz (5.22) i (5.23), naponi ispravnih faza zavise od operatorske funkcije $\tilde{A}$. Pomenuta funkcija odražava uticaj parametara mreže na tokove razmatranih napona. Naponi ispravnih faza zavise takođe i od trenutka kvara, odnosno od svojih stacionarnih vrednosti u pomenutom trenutku. Navedena zavisnost se u (5.22) i (5.23) obuhvata preko veličina $\tilde{u}_{ra}$, $\tilde{u}_{rb}$, $\tilde{u}_{rc}$.

Funkciji $\tilde{A}$ može se, u skladu sa (5.24), (3.57) i (5.25) dati oblik

$$\tilde{A}=\frac{s+\dfrac{r}{L}}{s\dfrac{L_{e0}}{L}+\dfrac{r_{e0}}{L}}\cdot \tag{5.28}$$
$$\cdot\frac{s^2\dfrac{L_{e0}}{L}\dfrac{C_0}{C}+s\left(\dfrac{L_{e0}}{L}\dfrac{G_0}{C_0}\dfrac{C_0}{C}+\dfrac{r_{e0}}{L}\dfrac{C_0}{C}\right)+\dfrac{r_{e0}}{L}\dfrac{G_0}{C_0}\dfrac{C_0}{C}+\dfrac{1}{L_0C_0}\dfrac{C_0}{C}\dfrac{L_0}{L}}{s^2+s\left(\dfrac{G}{L}+\dfrac{r}{L}\right)+\dfrac{r}{L}\dfrac{G}{C}+\dfrac{1}{L_0C_0}\dfrac{C_0}{C}\dfrac{L_0}{L}}.$$

Pri tome je, s obzirom na (5.26) i (5.27),

$$\frac{L_{e0}}{L}=\frac{L_0}{L}+3\frac{L_N}{L}, \tag{5.29}$$

$$\frac{r_{e0}}{L}=\frac{r_0}{L_0}\frac{L_0}{L}+\frac{3R_N}{L}. \tag{5.30}$$

U formulama (5.28) do (5.30) mogu se uočiti tri grupe parametara. U prvu grupu mogu se uvrstiti svi parametri koji obuhvataju gubitke u mreži i utiču na prigušenje prolaznih komponenti napona u prelaznim procesima kod zemljospoja i tako smanjuju prenapone. To su parametri: G/C, r/L, G_0/C_0, r_0/L_0. Pomenuti uticaj je obično reda 10%, kod slabo opterećenih mreža. Kada je mreža dobro opterećena odvodnost G ima veliku vrednost tako da može osetnije da priguši prolazne oscilacije napona.

Drugu grupu parametara sačinjavaju parametri L_0/L i C_0/C koji zavise od vrste i konstruktivnih karakteristika napojnog transformatora i vodova. Kod uobičajenih sprega napojnih transformatora i velikih snaga kratkog spoja napojne mreže može se, bez unošenja većih grešaka u analize, smatrati da je

$$\frac{L_0}{L}\approx 1. \tag{5.31}$$

Odnos C_0/C zavisi od vrste voda i njegovih konstruktivnih karakteristika i leži u opsegu 0,5÷1 (Tačka 1.1.2), pri čemu su niže vrednosti karakteristične za vazdušne vodove.

Parametri $3L_N/L$, $3R_N/L$, i $1/(L_0C_0)$ čine treću grupu. Oni se kod mreža mogu menjati u vrlo širokim opsezima, a prva dva neposredno zavise od izbora impedanse uzemljenja. Navedeni parametri zbog toga jako utiču na karakter procesa kod zemljospoja i mogu se smatrati karakterističnim parametrima mreže u tom pogledu.

Kod uzemljenja preko otpornika je $X_N=0$, tako da će u (5.28) postojati samo otpornost R_N.

Na osnovu (5.9) otpornost R_N može se izraziti kao

$$R_N=\frac{U_{nf}}{I_{z0}}. \tag{5.32}$$

Ako imamo u vidu da je induktivnost L jednaka

$$L=\frac{1}{\omega}\frac{U_{nf}}{I_{(3)}}, \tag{5.33}$$

gde je sa $I_{(3)}$ označena struja trofaznog kratkog spoja za kvar na sabirnicama transformatora na strani distributivne mreže, ima se

$$\frac{R_N}{L}=\omega\frac{I_{(3)}}{I_{z0}}. \tag{5.34}$$

Na isti način pokazuje se da je kod uzemljenja preko reaktanse

$$\frac{L_N}{L}=\frac{I_{(3)}}{I_{z0}}. \tag{5.35}$$

Kapacitet C_0 može se izraziti preko kapacitivne struje mreže, saglasno (3.7),

$$C_0=\frac{1}{\omega}\frac{I_c}{3U_{nf}}. \tag{5.36}$$

Na osnovu (5.31), (5.33) i (5.36) tako se dobija

$$\frac{1}{L_0C_0}=3\omega^2\frac{I_{(3)}}{I_c}. \tag{5.37}$$

Kako se vidi iz (5.34) do (5.37), osnovni parametri mreže koji utiču na tok i visinu napona ispravnih faza pri jednofaznom zemljospoju su odnosi struje trofaznog kratkog spoja prema podešenoj struji zemljospoja i kapacitivnoj struji mreže.

5.2.2. ANALIZA NA TRANZIJENTNIM MODELIMA

Opsežnu analizu prenapona u mrežama uzemljenim preko malih otpornosti i reaktansi izveo je Peterson (Peterson), pomoću eksperimenata na fizičkom modelu mreže [10]. Kod modelovanja su zanemareni svi parametri prve grupe a za parametre druge grupe usvojeno je $L_0=L$ i $C_0=C$. Eksperimenti sa jednofaznim zemljospojem ponovljeni su veliki broj puta za svaku kombinaciju vrednosti parametara treće grupe kako bi se ustanovili maksimalno mogući prenaponi kod različitih trenutaka nastanka kvara, koji su smatrani slučajnom veličinom.

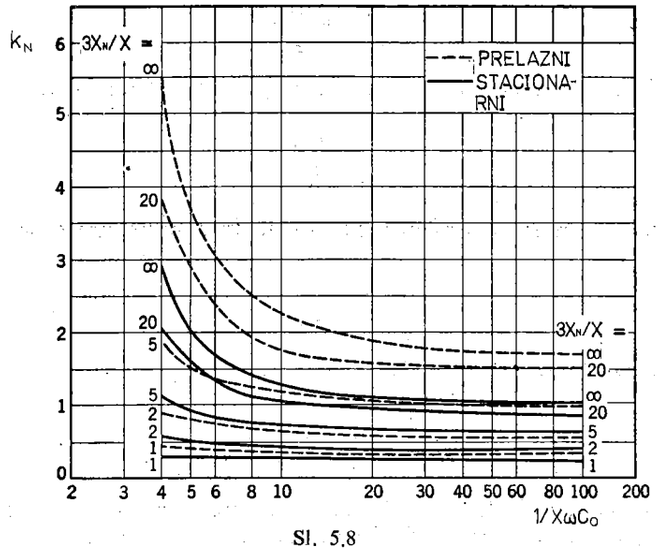
Rezultati analize prikazani su dijagramima na sl. 5.8 do 5.11. Na slikama su date krive maksimalne utvrđene vrednosti prelaznih (isprekidane linije) i stacionarnih (pune linije) prenapona u neutralnoj tački i na ispravnim fazama mreže za kvar na sabirnicama transformatora. Prenaponi su prikazani svedeno na nazivni fazni napon, tj. preko odgovarajućih faktora prenapona, a u funkciji parametra $1/(X\omega C_0)$, koji se, u skladu sa (5.31) i (5.37), može izraziti preko struja $I_{(3)}$ i I_c

$$\frac{1}{X\omega C_0}=3\frac{I_{(3)}}{I_c}. \tag{5.38}$$

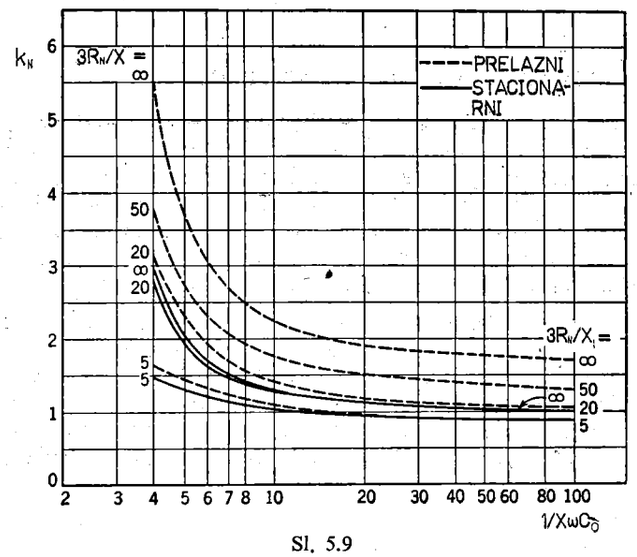
Parametri krivih su odnosi $3R_N/X$ i $3X_N/X$ koji se mogu, prema (5.34) i (5.35), prikazati kao

$$\frac{3R_N}{X} = 3\frac{I_{(3)}}{I_{z0}}, \tag{5.39}$$

$$\frac{3X_N}{X} = 3\frac{I_{(3)}}{I_{z0}}. \tag{5.40}$$



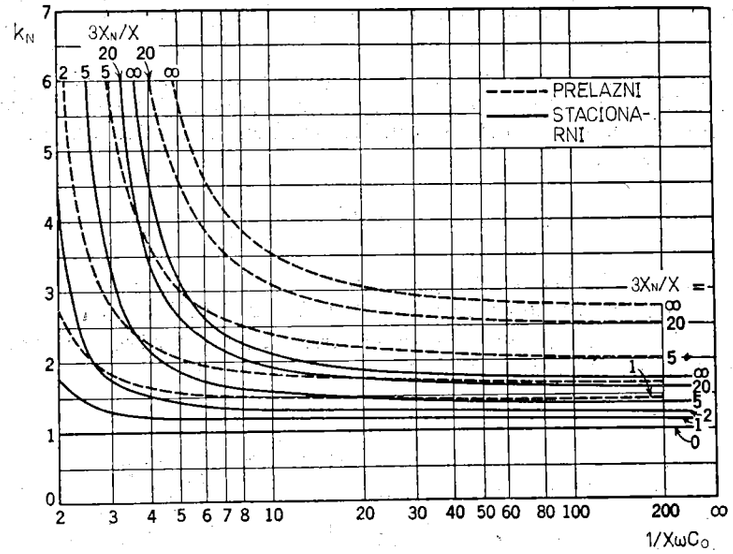
Sl. 5.8



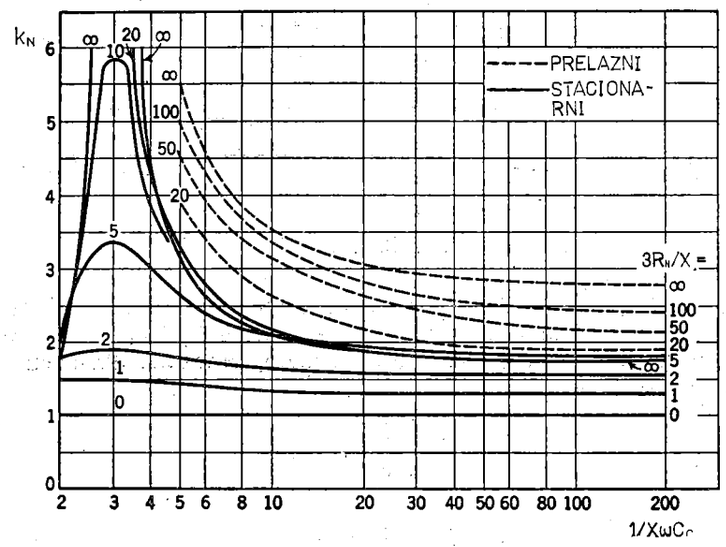
Sl. 5.9

Sl. 5.8 odnosi se na faktor prenapona u neutralnoj tački kod uzemljenja preko reaktanse, a sl. 5.9 na isti faktor, za slučaj uzemljenja preko otpornika.

Slike 5.10 i 5.11 daju vrednosti faktora prenapona ispravnih faza, prva kod uzemljenja preko reaktanse, a druga preko otpornika.



Sl. 5.10



Sl. 5.11

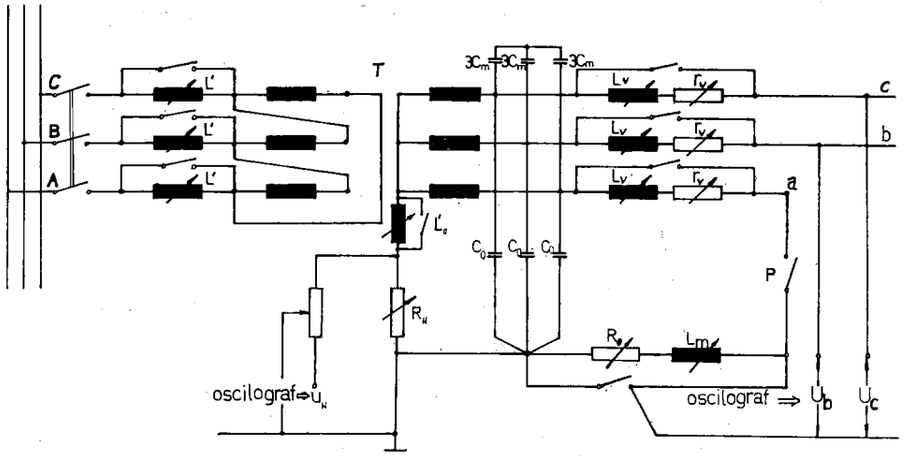
Kako se vidi sa priloženih dijagrama, uzemljenje preko malih otpornosti i reaktansi efikasno snižava prelazne prenapone u poređenju sa vrednostima koje se imaju kod izolovanih mreža (R_N, $X_N=\infty$). Pri tome se može uočiti da se uzemljenjem preko otpornika nešto bolje prigušuju prelazni prenaponi nego primenom reaktanse, iako se kod prvog načina uzemljenja pri $1/(X\omega C_0)\geqslant 10$ imaju veći stacionarni prenaponi. Ovo je u skladu sa približnim analizama izvedenim u Odeljku 5.1, koje važe uz zanemarenje uticaja kapaciteta mreže tj. kod velikih vrednosti parametara $1/X\omega C_0$, kakve su karakteristične u praktičnim uslovima.

Slična eksperimentalna analiza prenapona izvedena je i za mreže sa pojasnim kablovima IPO 13 preseka 3×95 mm², koji imaju papirnu izolaciju i olovni plašt [71]. Pomenuti kablovi odlikuju se relativno niskom vrednošću odnosa nultog i pogonskog kapaciteta

$$\frac{C_0}{C}\approx 0{,}57, \tag{5.41}$$

koja u izvesnoj meri snižava prenapone. Pomenuti kablovi koriste se u velikom obimu u mrežama 10 kV u Jugoslaviji kao i u nekim drugim zemljama.

Prenaponi su analizirani primenom tranzijentnog fizičkog modela mreže čija je opšta šema prikazana na sl. 5.12.



Sl. 5.12

Parametri L_v i r_v simuliraju pogonsku induktivnost i otpornost voda u kvaru koji figuriraju u šemi mreže za α redosled, a pomoću R_0 i L_m postižu se željene vrednosti parametara r_{v0} i L_{v0} voda u šemi nultog redosleda. Parametri R_0 i L_m određuju se relacijama:

$$R_0=\frac{1}{3}(r_{v0}-r_v).$$

$$L_m=\frac{1}{3}(L_{v0}-L_v). \tag{5.42}$$

Kapacitetima C_0 i C_m predstavljeni su ukupni nulti i međufazni kapaciteti vodova mreže respektivno. Kapacitet C_m može se, kako je poznato, izračunati iz pogonskog i nultog kapaciteta

$$3\,C_m=C-C_0. \tag{5.43}$$

Promenom L' i L_0' može se podesiti željena vrednost induktivnosti napojne mreže i transformatora u šemama za odgovarajuće redoslede.

Pri tome je

$$L_0=L_T+3\,L_0' \tag{5.44}$$

$$L=L_T+\frac{1}{m^2}L'. \tag{5.45}$$

U (5.44) i (5.45) L_T predstavlja induktivnost rasipanja napojnog transformatora svedenu na stranu mreže u zemljospoju, a m odnos preobražaja transformatora.

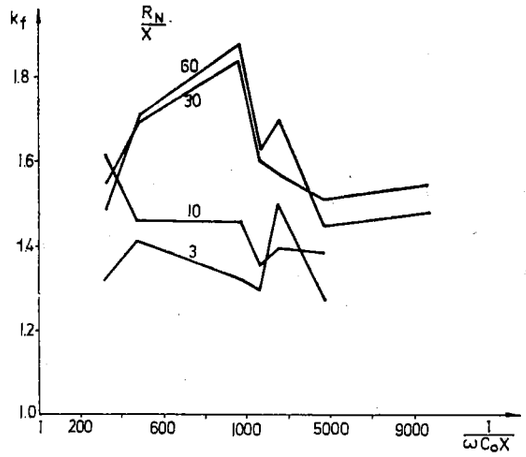
Induktivnosti L, L' i L_0 izrađene su kao kalemi sa otvorenim magnetnim jezgrom, tako da su linearne i lako se mogu ravnomerno podešavati izvlačenjem odnosno uvlačenjem jezgra.

Jednofazni zemljospoj se simulira zatvaranjem kontakta P, a naponi na karakterističnim mestima registruju se osciloskopski i snimaju filmskim kamerama ili primenom elektromagnetnih pisača.

Eksperimenti na modelu u [71] izvedeni su uz iste uprošćavajuće pretpostavke kao u [10], uz uvažavanje odnosa (5.41). U merenjima je istražena oblast vrednosti parametara

$$\frac{1}{X\,\omega\,C_0}>200,$$

koja je od posebnog značaja za praktične uslove. Rezultati analize prikazani su na sl. 5.13. Za svaku kombinaciju parametara izvedeno je u proseku 25 eksperimenata,



Sl. 5.13

a na dijagram je uneta maksimalna vrednost faktora prenapona od izmerenih 50 prenapona na ispravnim fazama. Izvesna neregularnost tokova krivih u poređenju

sa krivima na sl. 5.11 posledica je ograničenog broja eksperimenata, koji se pokazao nedovoljnim za vrlo tačno utvrđivanje ekstremnih vrednosti.

Kako se iz krivih na sl. 5.13 vidi, faktori prenapona utvrđeni u [71] ne prelaze vrednosti 1,88, 1,84, 1,62 i 1,50 za $R_N/X=60$, 30, 10, 3, respektivno. Ove su vrednosti dosta niže od odgovarajućih koje daju dijagrami na sl. 5.11. Navedene razlike treba prvenstveno pripisati pozitivnom uticaju međufaznih kapaciteta vodova koji su kod dijagrama na sl. 5.11 smatrani jednakim nuli.

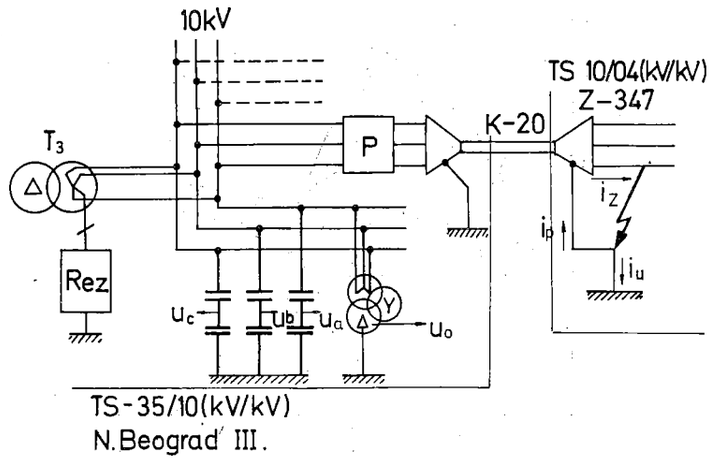
5.2.3. EKSPERIMENTI U MREŽI

U okviru studije načina uzemljenja neutralne tačke u kablovskoj mreži 10 kV Beograda izveden je niz eksperimenata sa jednofaznim zemljospojem pri izolovanoj neutralnoj tački i uzemljenju preko malih otpornosti raznih vrednosti [73, 78].

Osnovna svrha pomenutih merenja bila je analiza prenapona na ispravnim fazama pri nastanku i isključenju jednofaznog zemljospoja, kod različitih načina uzemljenja neutralne tačke i parametara mreže.

Pošto, kako je pokazano u 5.2.1, prenaponi pri jednofaznim zemljospojevima zavise od vrednosti određenih karakterističnih kombinacija parametara mreže, eksperimenti su izvođeni sa više uklopnih stanja mreže, sa različitim ukupnim dužinama vodova.

Kao eksperimentalno, izabrano je mrežno područje transformatorske stanice TS-35/10 kV, 4×8 MVA, Novi Beograd III. Mreža 10 kV je radijalna, kablovska sa kablovima IPO-13, 3×95 mm². Merenja su vršena u mreži napajanoj jednim od transformatora TS (transformator T_3). Dužina eksperimentalne mreže menjana je prebacivanjem vodova drugih transformatora u TS. Jednofazni zemljospoj uspostavljen je u TS 10/0,4 kV (TS Z-347) na jednom od izlazećih vodova (kabl K-20). Raspored mernih mesta i pregled vrsta merenja prikazan je na sl. 5.14.

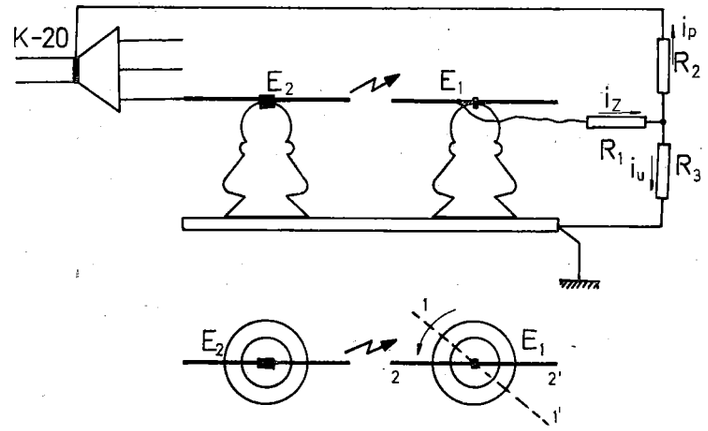


Sl. 5.14

Naponi faza prema zemlji snimani su osciloskopski na sabirnicama transformatora T_3 posredstvom kapacitivnih delila napona. Takođe je registrovana i nulta

komponenta napona preko otvorenog trougla merne grupe naponskih transformatora.

Da bi se eksperimentalni uslovi približili što je moguće više stvarnim, jednofazni zemljospojevi su simulirani preko uređaja za formiranje luka na mestu kvara, konstruisanog posebno u te svrhe (sl. 5.15). Zemljospoj se uspostavljao primicanjem



Sl. 5.15

pokretne elektrode E_1 nepokretnoj E_2, pošto je prethodno podešen razmak između elektroda. Elektroda E_1 se primiče E_2 zakretanjem oko tačke oslonca iz neutralnog položaja 11′ u položaj 22′. Opisani uređaj omogućio je merenje raspodele struja kvara u sistemu provodnik u kvaru — zemlja — olovni plašt kabla, snimanjem padova napona na malim otpornostima R_1, R_2, R_3, ubačenim u odgovarajuća strujna kola. Dobijeni podaci iskorišćeni su za određivanje redukcionog faktora kabla u pogonskim uslovima.

Kvarovi su se isključivali prekidačem P koji je aktiviran zemljospojnom zaštitom prevezanom na registrovanje aktivnih komponenti struja. Prekidač je malouljni.

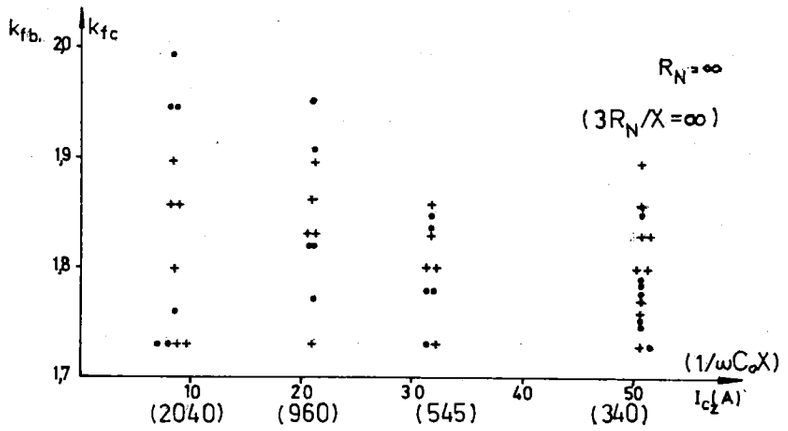
Eksperimenti su izvođeni noću, pri minimalnim opterećenjima mreže. Za svaku kombinaciju parametara merenja su ponavljana više puta.

Na sl. 5.16 do 5.19 prikazani su faktori prenapona na ispravnim fazama izmereni kod različitih kapacitivnih struja mreže, podešavanih izmenama uklopnih stanja. Oznaka ».« odnosi se na fazu »b«, a oznaka »+« na fazu »c«. Veći broj oznaka u istom redu ukazuje da je odgovarajuća vrednost faktora prenapona konstatovana, u ponovljenim merenjima, više puta.

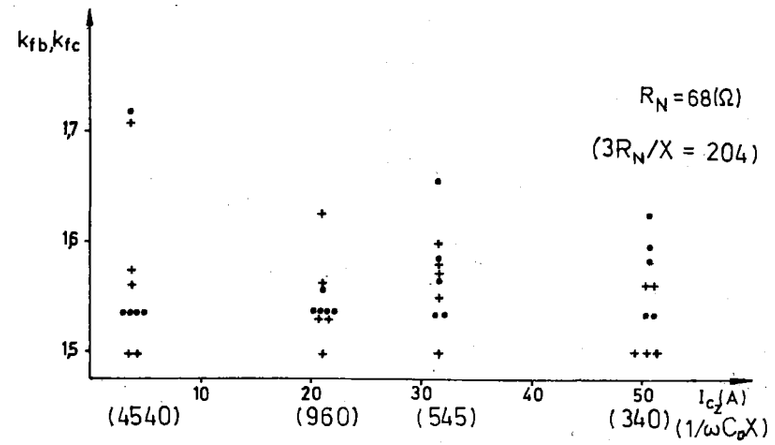
Radi lakšeg poređenja sa podacima navedenim u 5.2.2, kao i radi uopštavanja dobijenih rezultata, na dijagramima su, u zagradi, naznačene vrednosti parametara $3\,R_N/X$ i $1/(X\omega_0 C)$ koje je mreža imala u pojedinim eksperimentima.

Maksimalni faktori prenapona kod uzemljenja preko otpornika iznosili su 1,72, 1,59 i 1,64 za R_N=68, 18 i 12 (Ω), respektivno, kako se vidi sa prikazanih dijagrama.

Rezultati dobijeni opisanim merenjima bliski su vrednostima sa dijagrama na sl. 5.13 s tim što su zabeleženi maksimalni faktori prenapona za oko 10% niži.



Sl. 5.16

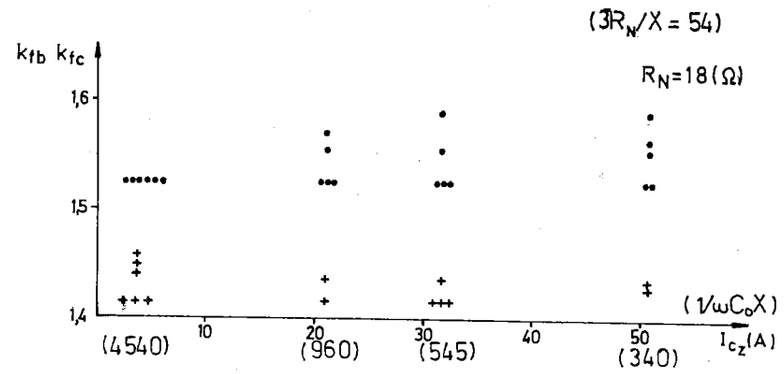


Sl. 5.17

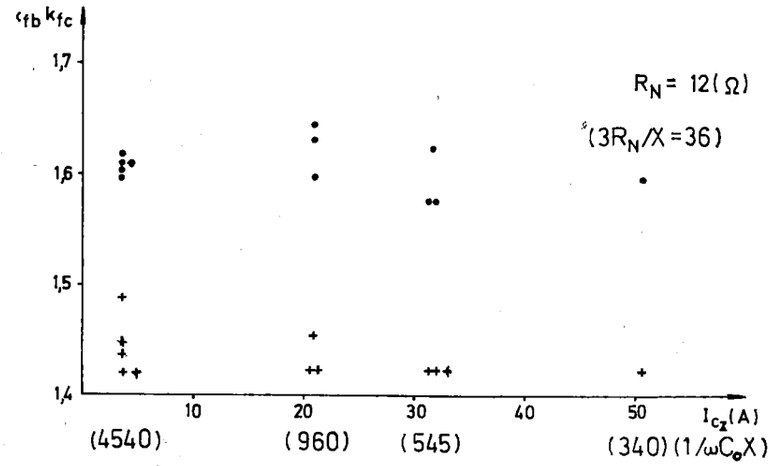
Pri isključivanju zemljospoja nisu utvrđeni nikakvi prenaponi.

Merenja prenapona pri jednofaznim zemljospojevima kod uzemljenja preko male otpornosti izvedena su i u mreži 35 kV u Istri [79]. Mreža je bila uzemljena preko otpornika od 21 Ω čemu odgovaraju struje jednofaznog zemljospoja reda 300 A. Zemljospoj je ostvarivan metalnim kontaktom i preko luka na izolatorima izazvanog tankim provodnikom. Merenja su vršena kod različitih uklopnih stanja mreže sa kapacitivnim strujama 6, 11 i 60 A. Zemljospojevi su ponavljani nekoliko puta za svaku šemu mreže i vrstu luka, a kvarovi su isključivani hidromatskim prekidačem.

Maksimalni faktor prenapona na ispravnim fazama pri uspostavljanju zemljospoja izmeren u eksperimentima bio je 1,25. Kod isključenja zemljospoja registrovani su, međutim, u pojedinim slučajevima i faktori prenapona reda 2,2—2,4, usled povratnih paljenja u prekidaču. Pomenuti faktori prenapona smanjili su se posle revizije prekidača.



Sl. 5.18



Sl. 5.19

Može se proceniti da su u eksperimentima karakteristični parametri mreže imali vrednost

$$\frac{3I_{(3)}}{I_c} \in (300,\ 3000), \quad \frac{3I_{(3)}}{I_{z0}} \approx 50.$$

Kako se vidi, prenaponi pri jednofaznom zemljospoju izmereni u realnim mrežama dosta su niži od vrednosti prikazanih na sl. 5.11, koje su ustanovljene

pomoću tranzijentnog modela. Primera radi, za $3R_N/X=50$ i $3I_{(3)}/I_C>200$ sa dijagrama na sl. 5.11 dobija se da je maksimalni očekivani faktor prenapona reda 2,2, što je od izmerenih 1,59 i 1,25, prema [78] odnosno [70], više za 28% i 43%, respektivno.

Ovakva odstupanja mogu se objasniti time što u modelovanju mreže u [10] nisu obuhvaćeni pojedini faktori koji prigušuju prenapone. Zanemaren je, kako je već ranije pomenuto, uticaj međusobnih kapaciteta vodova, koji je bio prisutan kod obeju eksperimentalnih mreža, nisu uračunate aktivne otpornosti električnog luka na mestu kvara i drugih elemenata mreže i potrošača, a takođe nije uvažavan ni uticaj zasićenja napojnog transformatora.

Sa druge strane, u mrežama je izveden konačan broj eksperimenata, tako da sigurno nisu obuhvaćeni svi mogući kritični uslovi u pogledu trenutka nastanka kvara, koji bi mogli da dovedu do većih prenapona.

Pošto su prenaponi izmereni u mreži dosta bliski vrednostima na sl. 5.13, dobijenim na tranzijentnom modelu pri uvažavanju uticaja međusobnih kapacitivnosti uz takođe konačan broj eksperimenata, može se proceniti da su pomenuta dva faktora najviše uslovila uočene razlike. Verovatnoća prenapona većih od datih na sl. 5.13, međutim, vrlo je mala pošto su navedene vrednosti dobijene uz veliki broj ponovljenih zemljospojeva.

5.3. IZBOR IMPEDANSE UZEMLJENJA SA STANOVIŠTA PRENAPONA

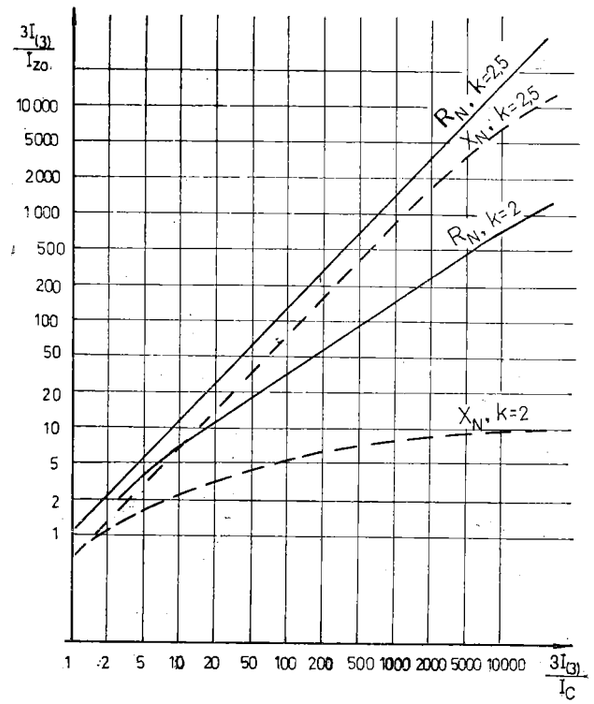
Zbog povećanih vrednosti struja kvara, kod uzemljenja neutralne tačke preko male impedanse električni luk na mestu jednofaznog zemljospoja je stabilan, tako da ne može da dođe do intremitentnih prenapona. Budući da impedansa uzemljenja obezbeđuje dobru galvansku vezu neutralne tačke sa zemljom preko koje se prazne nulti kapaciteti, u razmatranim mrežama ne bi moglo da dođe do opasnih prenapona, analiziranih u Odeljku 3.4 za izolovane mreže, ni u slučaju eventualnog uzastopnog gašenja i paljenja luka.

Kod isključenja jednofaznih zemljospojeva, nezavisno od toga da li je uzemljenje izvedeno preko otpornika ili reaktanse, mogu se pojaviti prenaponi usled prekidanja kapacitivnih struja ispravnih faza, koji su opisani u 3.5. Pomenuti prenaponi posledica su loših karakteristika ili neispravnosti prekidača i vrlo su retki. Uzemljenjem preko otpornika, kako su pokazali eksperimenti [70], razmatrani prenaponi se osetno prigušuju i kada do njih dođe.

Kod uzemljenja preko reaktanse mogu se pri isključivanju faze u kvaru pojaviti prenaponi opisani u Tački 4.4.1, karakteristični za prekidanje manjih induktivnih struja. Verovatnoća nastanka i visina ovakvih prenapona zavisi, kako je već rečeno u Odeljku 4.4, od karakteristika prekidača i konfiguracije mreže. Pomenutae pojave ne nastaju kada pored voda u kvaru sa napojnih sabirnica u TS polaze i drugi vodovi, čime se povećavaju kapaciteti preko kojih se oslobađa energija prigušnice. Kod prekidača kod kojih intenzitet gašenja luka zavisi od vrednosti struja koje se prekidaju, kakvi su prekidači sa uljnim gašenjem, razmatrane pojave vrlo su retke.

U slučaju primene reaktanse za uzemljenje, moguća je pojava visokih prenapona pri isključivanju složenijih zemljospojeva [31], iz istih razloga kao kod kompenzovanih mreža (Tačka 4.4.2). Ovi prenaponi uslovljeni su konfiguracijom i karakteristikama mreže, a manje zavise od svojstava prekidača.

Izabrana vrsta i vrednost otpora uzemljenja najneposrednije utiče na visinu prenapona pri nastanku zemljospoja, kako su pokazala razmatranja u Odeljku 5.2. Zato se može smatrati logičnim da se izbor uzemljenja učini prvenstveno sa stanovišta pomenutih prenapona. Ostali mogući prenaponi su retki i teško ih je predvideti u fazi projektovanja mreže. Oni se, ako u pogonu češće nastaju, mogu otkloniti redovnim održavanjem prekidača, propisivanjem povoljnog redosleda manipulacija u mreži, pa i, izuzetno, zamenom prekidača ili otpora za uzemljenje.



Sl. 5.20

Na osnovu dijagrama na sl. 5.10 i sl. 5.11 mogu se odrediti granične vrednosti karakterističnog odnosa $3I_{(3)}/I_{zo}$ pri kojima se za različito $3I_{(3)}/I_c$ neće preći određene usvojene vrednosti faktora prenapona na ispravnim fazama. Na sl. 5.20 su, primera radi, prikazane granične vrednosti odnosa $3I_{(3)}/I_{zo}$ za slučaj uzemljenja preko otpornika (puno izvučene krive) i preko reaktanse (isprekidane krive), pri kojima se, kod nastanka jednofaznog zemljospoja, neće imati faktori prenapona veći od 2,5 odnosno 2. Krive su dobijene pomoću pomenutih dijagrama Petersona. Vrednosti za $3I_{(3)}/I_c>200$ određene su ekstrapolacijom.

Dijagrami na sl. 5.20 daju gornje granične vrednosti $3I_{(3)}/I_{zo}$ za usvojene faktore prenapona, tako da će se, ako se za mrežu izaberu manje vrednosti $3I_{(3)}/I_{zo}$ od navedenih imati niži faktori prenapona.

Pri korišćenju prikazanih dijagrama treba imati u vidu da oni važe za iste uslove i uz ista ograničenja kao i dijagrami na sl. 5.10 i sl. 5.11. Zbog učinjenih pretpostavki i zanemarenja različitih prigušujućih efekata koje postoje u stvarnim

mrežama (Odeljak 5.2), stvarni faktori prenapona koji će se postići u mrežama niži su od uzetih karakterističnih vrednosti. Može se smatrati da su realne vrednosti faktora prenapona koje se mogu očekivati u vazdušnim mrežama i kablovskim mrežama sa pojasnim kablovima IPO tipa, manji od pomenutih usvojenih karakterističnih vrednosti za reda 10÷15%, a kod ostalih mreža, za reda 5÷10%. Kod prvo pomenutih mreža stvarni faktori prenapona kod izbora uzemljenja prema krivama za $k=2{,}5$ iznosiće, znači, najviše 2,13÷2,25, a prema krivama za $k=2$, najviše 1,7÷1,8. Kod ostalih mreža odgovarajući faktori prenapona neće biti veći od 2,25÷2,38 odnosno 1,8÷1,9.

Navedene vrednosti faktora prenapona pokazuju da će se u najvećem broju slučajeva sasvim povoljni uslovi u pogledu prenapona postići ako se otpor uzemljenja izabere prema krivama za $k=2{,}5$. Navedeni dijagram daje umerene vrednosti struja I_{zo}, što je povoljno sa stanovišta uslova uzemljenja i uticaja na telekomunikacione vodove.

Održavanje nižih faktora prenapona, na primer onih prema krivama za $k=2$, može se smatrati opravdanim samo u pojedinim specifičnim okolnostima (direktno napajanje električnih motora ili drugih osetljivih potrošača, postojanje dugih radijalnih pravaca u mreži bez usputnih odvoda i dr.).

Primenu priloženih dijagrama ilustrovaćemo na jednom karakterističnom primeru. Neka snaga trofaznog kratkog spoja na sabirnicama 10 kV u TS-110/10 kV iznosi 250 MVA, a kapacitivna struja mreže 10 kV je $I_c=100$ A. Struja trofaznog kratkog spoja biće $I_{(3)}=250/(\sqrt{3}\,10)=14{,}45$ kA, tako da je $3\,I_{(3)}/100=433$. Za izračunatu vrednost, prema krivoj za R_N i $k=2{,}5$ na sl. 5.20 treba da bude $3\,I_{(3)}/I_{zo}\leqslant 600$, odakle se dobija $I_{zo}\geqslant 72$ A. Potrebna vrednost otpora uzemljenja iznosila bi $R_N=U_{nf}/I_{zo}\leqslant 10/(\sqrt{3}\,72)\cdot 10^3=80{,}3\ \Omega$. Prema krivoj za R_N i $k=2$ dobilo bi se $3\,I_{(3)}/I_{zo}\leqslant 90$ iz čega sledi $I_{zo}\geqslant 481$ A i $R_N\leqslant 12\ \Omega$. U slučaju da se želi uzemljenje preko reaktanse, za $k=2{,}5$ imalo bi se $I_{zo}\geqslant 137$ A i $X_N\leqslant 42{,}2\ \Omega$, a za $k=2$, $I_{zo}\geqslant 6{,}4$ kA, $X_N\leqslant 0{,}9\ \Omega$. Kako se vidi, kod primena prigušnica za iste faktore prenapona potrebne su znatno niže vrednosti otpora i veće struje zemljospoja nego kod uzemljenja preko otpornika.

5.4. OTPORNICI ZA UZEMLJENJE

Otpornici za uzemljenje izode se kao tečni — elektrolitski ili metalni. Kod prvih se kao elektrolit najčešće koristi rastvor kalcinisane sode u destilisanoj vodi. Metalni otpornici obično su izvedeni sa elementima od livenog gvožđa.

5.4.1. OSNOVNE KARAKTERISTIKE

U toku jednofaznog zemljospoja kroz otpornik protiču znatne struje, tako da se veliki deo električne energije mreže u otporniku pretvara u toplotnu energiju. Otpornik treba dimenzionisati tako da se pri tom ne zagreje previše kako ne bi došlo do prevelike promene otpornosti i, usled toga i struje zemljospoja, od željenih vrednosti.

Tok zagrevanja otpornika za vreme jednofaznog zemljospoja, uz pretpostavku da se ovo odvija adijabatski, određen je jednačinom

$$\int_0^t i_z^2\,\mathrm{d}\,t=\int_{\vartheta_0}^{\vartheta}\frac{mC_\vartheta}{R_\vartheta}\,\mathrm{d}\,\vartheta, \tag{5.46}$$

gde su

i_z — trenutne vrednosti struje jednofaznog zemljospoja
t — vreme trajanja kvara
m — masa otpornika
c_ϑ — specifična toplota otpornika na temperaturi ϑ
R_ϑ — električna otpornost otpornika na temperaturi ϑ
ϑ_0, ϑ — temperature otpornika u trenucima 0 i t, respektivno
$\int_0^t i_z^2\mathrm{d}t$ — toplotni impuls struje i_z.

Dozvoljene vrednosti toplotnog impulsa struje zemljospoja određuju se iz (5.46) za

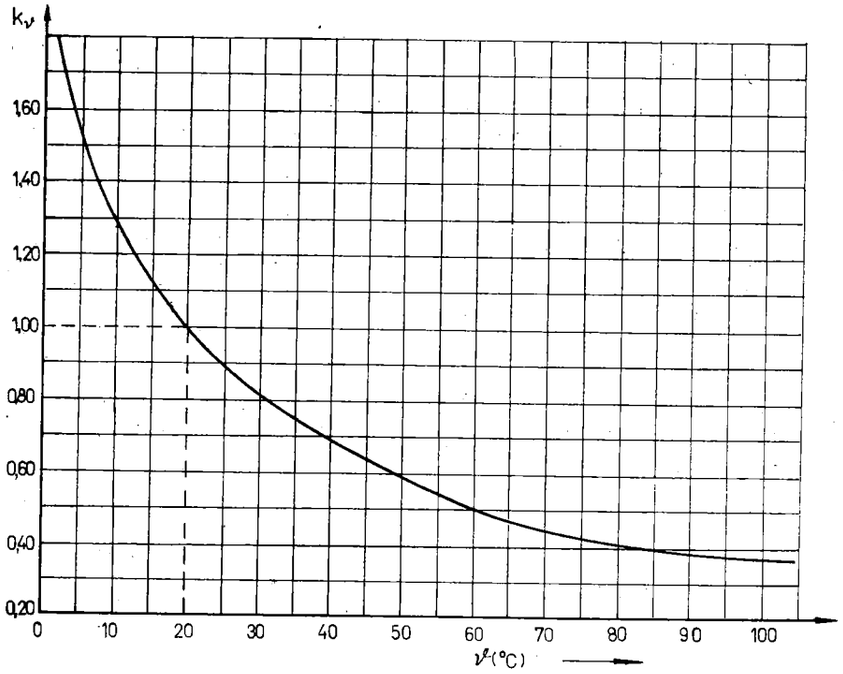
$$\vartheta=\vartheta_g, \tag{5.47}$$

gde je ϑ_g granično dopustiva temperatura otpornika.

Kod elektrolitskih otpornika zavisnost otpornosti od temperature može se opisati relacijom

$$R_\vartheta=k_\vartheta R_{20}, \tag{5.48}$$

gde je sa k_ϑ označen eksperimentalno utvrđeni temperaturni popravni sačinilac. R_{20} predstavlja vrednost otpornosti pri temperaturi 20 °C. Zavisnost sačinioca k_ϑ od temperature kod otpornika sa vodenim rastvorom kalcinisane sode prikazana je grafički na sl. 5.21.



Sl. 5.21

Otpornost metalnog otpornika menja se sa temperaturom prema izrazu

$$R=R_{20}\,[1+\alpha\,(\vartheta-20)]. \tag{5.49}$$

Kako se vidi, kod elektrolitskih otpornika pri povećanju temperature dolazi do smanjenja otpornosti, a ne do povećanja kao kod metalnih otpornika. Promena otpornosti je znatno izraženija kod elektrolitskih otpornika nego kod metalnih, koji se odlikuju dosta niskim temperaturnim sačiniocima otpornosti (primera radi, liveno gvožđe ima $\alpha\approx 1{,}9\cdot 10^{-3}\ ^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$).

Ako se u (5.46) toplotni impuls prikaže preko efektivne vrednosti struje zemljospoja, a specifična toplota c_s i otpornost R_s zamene svojim srednjim vrednostima c_s i R_s u temperaturnom opsegu $\vartheta_0 \div \vartheta_g$, dolazi se do odnosa

$$I_z^2 t \leqslant \frac{mc_s}{R_s}(\vartheta_g-\vartheta_0). \tag{5.50}$$

Potrebna masa otpornika je, prema tome,

$$m \geqslant \frac{R_s I_z^2 t}{c_s(\vartheta_g-\vartheta_0)}. \tag{5.51}$$

Budući da je

$$R_s \approx \frac{U_n}{\sqrt{3}\,I_z},$$

gde je sa U_n označen nazivni napon mreže, izrazu (5.51) može se dati oblik

$$m \geqslant \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{U_n I_z t}{c_s(\vartheta_g-\vartheta_0)}. \tag{5.52}$$

Iz (5.52) se za elektrolitske otpornike pri $\vartheta_g=35\ ^{\circ}\mathrm{C}$, $\vartheta_0=20\ ^{\circ}\mathrm{C}$ i $c_s=4186{,}8$ J/kg °C dobija

$$m \geqslant 9{,}2\cdot 10^{-6}\,U_n I_z t. \tag{5.53}$$

Primera radi, elektrolitski otpornik za uzemljenje mreže $U_n=35$ kV za $I_z=1\,000$ A morao bi, ako se za vreme trajanja kvara usvoji 10 s, imati masu

$$m = 9{,}2\cdot 10^{-6}\cdot 10^{6}\cdot 35\cdot 10 = 3220\ \mathrm{kg},$$

tj. zapreminu od 3,2 m³.

Kod metalnih otpornika mogu se, zbog malih temperaturnih koeficijenata otpornosti, dozvoliti znatno veći opsezi promene temperature. Za, na primer, $\vartheta_g-\vartheta_0=100\ ^{\circ}\mathrm{C}$ i $c_s\approx 540$ J/kg °C, koliko se može usvojiti za liveno gvožđe, iz (5.53) se izračunava

$$m \geqslant 1{,}07\cdot 10^{-5}\,U_n I_z t. \tag{5.54}$$

Za iste uslove u mreži 35 kV kao u prethodnom primeru, metalni otpornik od livenog gvožđa morao bi da ima masu

$$m\approx 3760\ \mathrm{kg}$$

čemu odgovara ukupna zapremina elemenata od 0,5 m³.

Dimenzije otpornika trebalo bi birati i sa stanovišta zagrevanja usled trajnih struja koje se mogu imati, naprimer, kod jednofaznih zemljospojeva sa velikim prelaznim otporom na mestu kvara, kada je struja kvara manja od struje reagovanja zemljospojne zaštite.

Uslovi zagrevanja otpornika pri trajnom provođenju struje određeni su jednačinom bilansa stvorene i odvedene toplote

$$R_{\vartheta d}\,I_{zt}^2 = \int_S K(\vartheta_{td}-\vartheta_a)\cdot dS. \tag{5.55}$$

U (5.55) je

I_{zt} — efektivna vrednost trajne struje zemljospoja
S — povr;ina hlađenja
K — ekvivalentni sačinilac hlađenja sa površine dS
ϑ_{td} — trajno dozvoljena temperatura otpornika
ϑ_a — temperatura okoline
$R_{\vartheta d}$ — otpornost pri temperaturi ϑ_{td}.

Sačiniocem K obuhvaćeni su svi vidovi hlađenja otpornika. Pomenuti sačinilac jako zavisi od primenjene vrste hlađenja (na primer [67]).

Ako se za K usvoji srednja vrednost za površinu hlađenja i smatra da svi delovi površine otpornika imaju jednako ϑ_{td}, iz (5.55) se dobija

$$S = \frac{R_{\vartheta d}\,I_{zt}^2}{K(\vartheta_{td}-\vartheta_a)}. \tag{5.56}$$

Na osnovu (5.56) može se za otpornik sa datim S i K proceniti granična vrednost trajno dozvoljene struje

$$I_{zt} = \sqrt{\frac{SK(\vartheta_{td}-\vartheta_a)}{R_{\vartheta d}}}. \tag{5.57}$$

Način proračuna sačinioca K u različitim slučajevima prikazan je detaljno u [67]. Za elektrolitske otpornike može se orijentaciono usvojiti $K\approx 6\div 10$ W/m² °C

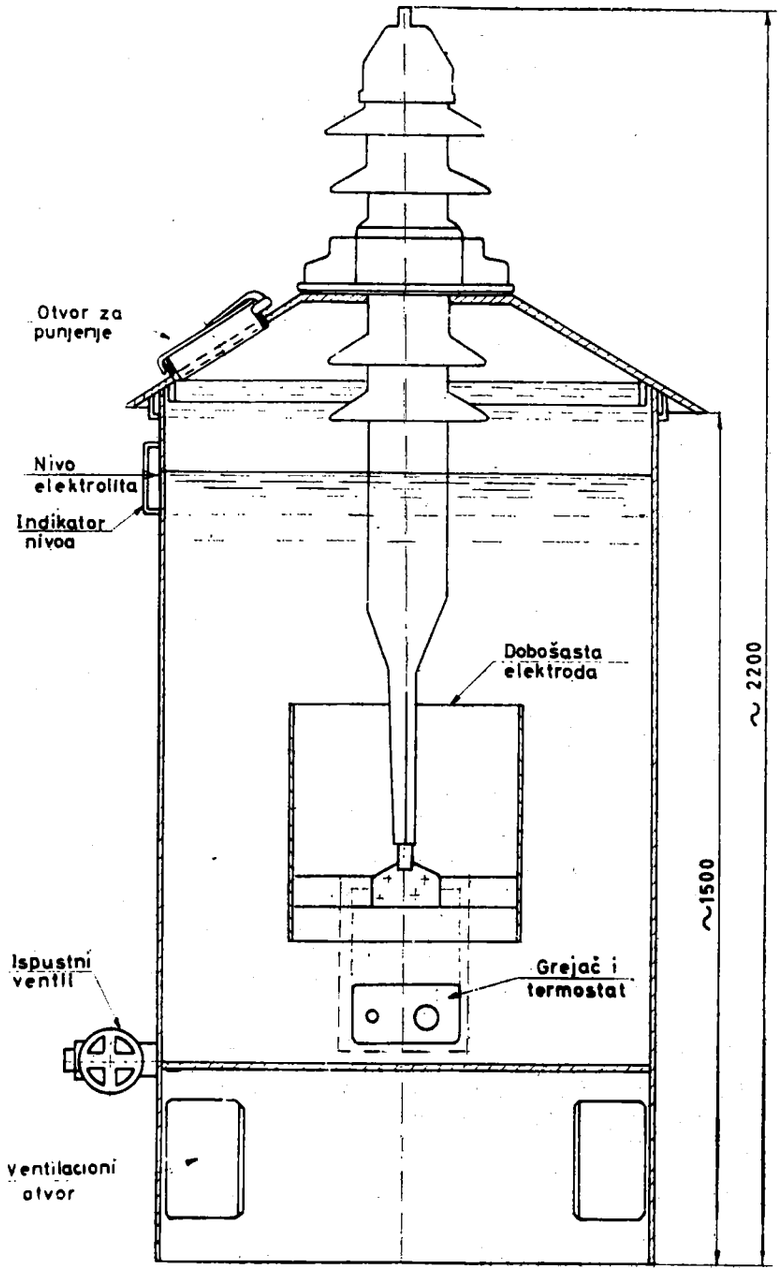
Dimenzije metalnog otpornika uslovljene su i potrebnim vrednostima otpornosti, koje određuju dužinu, broj i presek elemenata. Kod vodenih otpornika otpornosti se mogu menjati u širokom opsegu promenom koncentracije rastvora, tako da se u ovom pogledu ne postavljaju posebni konstruktivni zahtevi.

5.4.2. NAZIVNE VELIČINE I KONSTRUKTIVNE KARAKTERISTIKE

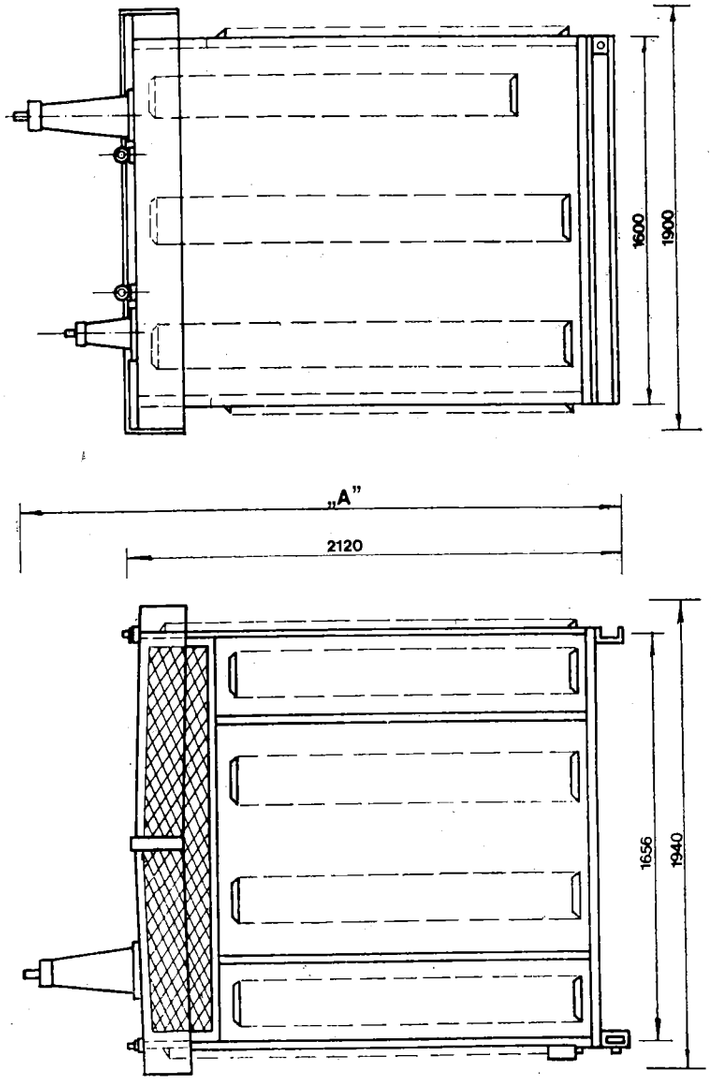
Nazivni napon otpornika određuje izolovanost prema zemlji priključnih krajeva. Elektrolitski otpornici se izvode isključivo kao jednopolno izolovani budući da elektrodu koja se vezuje za uzemljenje postrojenja čini sam sud otpornika. Metalni otpornici koji se, kada su u pitanju veće snage, vezuju ponekad u redne kombinacije više pojedinačnih konstrukcija [79], rade se sa oba kraja izolovana od kućišta.

Nazivni napon bira se saglasno nazivnom naponu mreže

$$U_{n0} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}. \tag{5.58}$$



Sl. 5.22



Називни напон мреже (kv)	Називни напон отпорника (kv)	Кота „A" (mm)	Тежина kg
10	6	2375	900
20	12	2550	1000

Sl. 5.23

Nazivna struja otpornika I_{n0} definiše se kao struja koja će proticati kroz otpornik kada se na njegovim krajevima uspostavi napon U_{n0}. Preko ovako definisane struje određena je vrednost otpornosti

$$R_n = \frac{U_{n0}}{I_{n0}}. \tag{5.59}$$

Relacija (5.59) utvrđuje vrednost otpornosti koju otpornik ima pri standardnoj temperaturi okoline, naprimer, 20 °C. Stvarne vrednosti otpornosti pri nastanku kvara razlikovaće se od R_n zbog zagrevanja otpornika (Tačka 5.4.1).

Struja I_{n0} preko koje se definiše R_n nema, jasno, uobičajeni smisao nazivnih struja, jer se ne dozvoljava trajno. Radi preciziranja uslova rada otpornika u pogledu zagrevanja i mogućih odstupanja otpornosti od nazivne vrednosti, proizvođač obično utvrđuje dozvoljeno trajanje struje I_{n0} ili dozvoljeni ciklus opterećivanja: struja — vreme. Za definisane uslove opterećenja treba pri tom svakako dati i podatke o graničnim vrednostima otpornosti, pošto je to značajno za podešenje zemljospojne zaštite i dimenzionisanje uzemljenja objekata u mreži koja se uzemljuje.

Radi izbora zaštite od »visoko-omskih« zemljospojeva proizvođač takođe treba da da podatke o trajno dozvoljenoj struji otpornika I_{t0}.

Na sl. 5.22 prikazan je šematski izgled jednog elektrolitskog otpornika 10 kV proizvodnje »Minel« Beograd.

Elektroda otpornika koja se vezuje za neutralnu tačku transformatora je cilindričnog oblika i nalazi se u unutrašnjosti suda otpornika, takođe cilindričnog oblika, koji predstavlja ujedno i drugu elektrodu.

Sud otpornika ima ugrađen ventil za ispuštanje elektrolita, ormančić sa termostatom i grejačem snage 2,5 kW i pokazivač nivoa. Sud je izrađen od toplo galvanizovanog lima koji je otporan na koroziju.

Na poklopcu suda nalazi se otvor za punjenje otpornika i mešanje elektrolita. Poklopac predstavlja i krajnji »ventil sigurnosti« za slučaj otkazivanja svih zaštita, pošto će se, pod pritiskom, kod intenzivnog isparavanja elektrolita, odvojiti od suda i tako sprečiti eksploziju.

Grejač služi za zagrevanje elektrolita pri niskim temperaturama i uključuje se automatski.

Na sl. 5.23 prikazan je metalni otpornik sa elementima od livenog gvožđa, za mreže 10 i 20 kV i nazivnu struju 300 A proizvodnje »Rade Končar«, Zagreb. Otpornik je hlađen vazduhom. Osnovne dimenzije date su na slici.

5.4.3. POREĐENJE, PREDNOSTI I NEDOSTACI

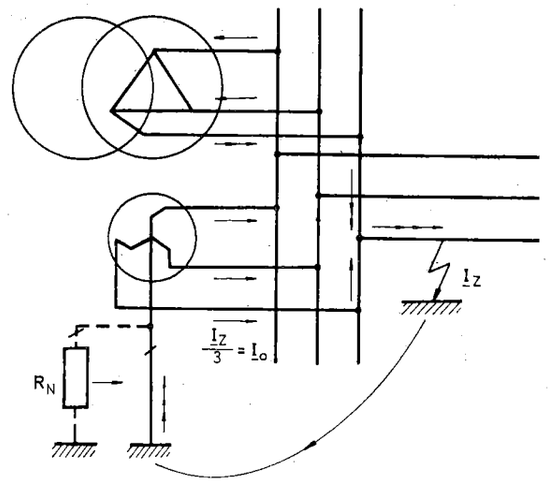
Kako je pokazala analiza u Tački 5.4.1, metalni otpornik za iste uslove opterećivanja zahteva nešto više materijala od elektrolitskog otpornika. Pošto je kod metalnog otpornika u pitanju aktivni materijal, ovaj je svakako skuplji od elektrolitskog. Kod nazivnih snaga $U_{n0}\,I_{n0}$ većih od reda 6 MW, zbog uslova hlađenja metalni otpornici se ponekad rade, kako je ranije rečeno, iz nekoliko posebnih delova koji se vezuju na red. Ovo povećava ukupni gabarit otpornika i čini ga nekoliko puta većim nego u slučaju primene elektrolitskog otpornika.

Metalni otpornik ima konstruktivno određenu vrednost otpora. U slučaju potreba da se u mreži poveća struja zemljospoja, na primer usled porasta ukupne dužine vodova, metalni otpornik se mora menjati ili se moraju dograditi dodatni otpornici, za šta treba predvideti prostor u postrojenju. Otpornost elektrolitskog otpornika može se podešavati u širokom opsegu promenama koncentracije rastvora bez ikakvih drugih izmena.

Pored navedenih prednosti, elektrolitski otpornik ima i određenih mana u poređenju sa metalnim otpornicima. Elektrolitski otpornik zahteva brižljivije održavanje i kontrolu zbog mogućnosti isparavanja, zaprljanja i zaleđivanja elektrolita. Zbog toga je potrebno vršiti povremeno kontrolna merenja otpornosti, proveravati ispravnost termostata i grejača. Sud otpornika treba da bude izveden sa vrlo kvalitetnom antikorozionom zaštitom da ne bi došlo do prevremenog starenja. Pored toga, kako se vidi na sl. 5.21, otpornost elektrolita dosta zavisi od temperature okoline. Pri temperaturama reda 40—45 °C, kakve se mogu imati u letnjim mesecima na suncu, primera radi, otpornost pada na oko 70% svoje vrednosti pri 20 °C. Ako se ima u vidu i dodatno zagrevanje elektrolita kod pojave jednofaznog zemljospoja, može se proceniti da u pojedinim slučajevima otpornost može da opadne čak do 50% svoje nazivne vrednosti, što bi dovelo do udvostručenja struje zemljospoja, kod bliskih kvarova. Iz navedenog razloga elektrolitske otpornike treba postavljati na mesta zaklonjena od sunca ili u zgradi.

5.5. TANSFORMATORI ZA UZEMLJENJE I PRIGUŠNICE

Kada napojni transformator na strani distributivne mreže nema neutralnu tačku, uzemljenje se može izvesti posredstvom posebnog transformatora ugrađenog u tu svrhu, slično kao sa Bauhovim transformatorom (Odeljak 4.5).



Sl. 5.24

Na sl. 5.24 prikazan je, primera radi, način uzemljenja neutralne tačke preko jednonamotajnog transformatora spregnutog u izlomljenu zvezdu. Kada se želi uze-

mljenje preko reaktanse, neutralna tačka pomoćnog transformatora uzemljuje se obično direktno, tako da struju zemljospoja ograničava nulta reaktansa transformatora. Ako je pomenuta reaktansa nedovoljno velika, u neutralnu tačku transformatora za uzemljenje može se ugraditi dodatna prigušnica. U slučaju da se želi izbeći čisto reaktivno uzemljenje da bi se postiglo efikasnije prigušenje prenapona, u neutralnu tačku pomoćnog transformatora uključuje se otpornik za uzemljenje (sl. 5.24). Obično se smatra da će pomenuti prigušujući uticaj otpornika doći do izražaja ako bude zadovoljen uslov [11]

$$\frac{R_0}{X_{0T}}=\frac{3R_N+R_{0T}}{X_{0T}}\geqslant 2. \tag{5.60}$$

Ovde su

R_0 — ukupna otpornost mreže za nulti redosled,

R_N — otpornost otpornika za uzemljenje

R_{0T}, X_{0T} — nulta otpornost i reaktansa transformatora za uzemljenje.

Pri tom je takođe poželjno, kako bi se smanjili prelazni prenaponi pri nastanku jednofaznog zemljospoja, da reaktansa X_{0T} ima umerenu vrednost tako da bude

$$\frac{X_{0T}}{X_M}\leqslant 10, \tag{5.61}$$

gde je sa X_M označena pogonska reaktansa napojne mreže i transformatora [29].

Potreba za primenom transformatora za uzemljenje često se pojavljuje u distributivnim mrežama koje se napajaju iz različitih transformacija, kada se u mrežama žele, u svim područjima, zadržati jednaki fazni stavovi. Primera radi, područje mreže 10 kV koje se napaja preko transformacija 110/35 kV, Yyo, i 35/10 kV, Dy5, ima za $5\cdot 30°$ pomerene fazne stavove napona u odnosu na mrežu 110 kV. Da bi područje mreže koja se napaja iz transformacije 110/10 kV imalo jednake fazne stavove kao prethodno područje, potrebno je u transformatorsku stanicu 110/10 kV ugraditi transformatore sa sprežnim brojem 5. Pošto izolacioni nivo mreže 110 kV često iziskuje direktno uzemljenje neutralne tačke na strani 110 kV, u posmatranom će slučaju, znači, doći u obzir primena sprege Yd5. Pomenuta sprega ima trougao na strani 10 kV. Uzemljenje neutralne tačke mreže 10 kV moći će se, prema tome, ostvariti jedino preko transformatora za uzemljenje.

5.5.1. POTREBNA SNAGA TRANSFORMATORA KOD TRAJNOG RADA SA ZEMLJOSPOJEM

Napone i struje transformatora za uzemljenje u režimu sa jednofaznim zemljospojem analiziraćemo za slučaj kvara u neposrednoj blizini sabirnica napojnog transformatora, zanemarujući uticaj kapaciteta vodova. Pretpostavićemo da se transformator za uzemljenje upotrebljava isključivo za ovu svrhu, tako da je izveden kao jednonamotajni ili dvonamotajni sprege Yd5 sa neopterećenim sekundarom.

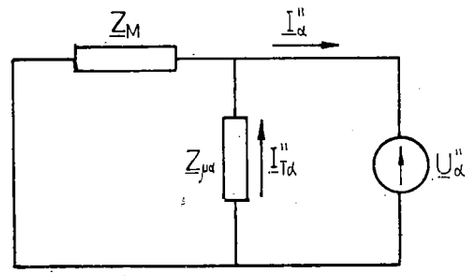
Šema impedansi razmatrane mreže za α-redosled prikazana je na sl. 5.25. Sa $\underline{Z}_M$ označena je impedansa napojne mreže i transformatora, a sa $\underline{Z}_{\mu\alpha}$ impedansa magnećenja transformatora za uzemljenje, saglasno prethodno učinjenoj pretpostavci. Budući da je

$$Z_M\ll Z_{\mu\alpha}, \tag{5.62}$$

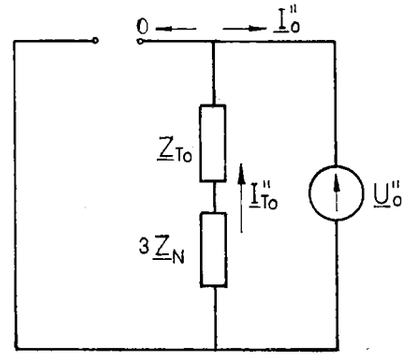
iz šeme se za rezultantnu impedansu mreže za α redosled dobija

$$\underline{Z}_\alpha\approx\underline{Z}_M. \tag{5.63}$$

Šema za nulti redosled prikazana je na sl. 5.26. Sa $\underline{Z}_N$ označena je impedansa uključena u neutralnu tačku transformatora za uzemljenje.



Sl. 5.25



Sl. 5.26

Iz šeme se za nultu impedansu mreže dobija

$$\underline{Z}_O=3\underline{Z}_N+\underline{Z}_{TO}. \tag{5.64}$$

Prema relacijama (1.15), (1.19) i (1.20), primenjenim na kompleksne veličine, ima se

$$\underline{U}_\alpha''=-\frac{2\underline{Z}_\alpha\underline{U}_{ra}}{2\underline{Z}_\alpha+\underline{Z}_0} \tag{5.65}$$

$$\underline{U}_\beta''=0 \tag{5.66}$$

$$\underline{U}_0''=-\frac{\underline{Z}_0\underline{U}_{ra}}{2\underline{Z}_\alpha+\underline{Z}_0}. \tag{5.67}$$

Budući da za impedanse (5.63) i (5.64) po pravilu važi

$$Z_0\gg Z_\alpha, \tag{5.68}$$

iz (5.65) i (5.67) se dobija

$$\underline{U}_0''\approx-\underline{U}_{ra}, \tag{5.69}$$

$$U_\alpha''\approx\frac{2\underline{Z}_\alpha}{\underline{Z}_0}\underline{U}_{ra},$$

iz čega sledi

$$U_\alpha''\ll U_0''. \tag{5.70}$$

Stvarni naponi faza a, b i c na mestu kvara, tj. na krajevima transformatora za uzemljenje, dobijaju se kada se vrednosti (5.69) i (5.70) saberu sa radnim napo-

nima mreže u režimu bez zemljospoja (Tačka 1.1.1). S obzirom na (5.66) i (5.70) može se približno pisati

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{ra} + \underline{U}_0'' \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{rb} + \underline{U}_0'' \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{rc} + \underline{U}_0''. \end{aligned} \tag{5.71}$$

Saglasno (5.62) i (5.66) biće

$$\begin{aligned} I_{T\alpha}'' &\approx 0, \\ I_{T\beta}'' &= 0. \end{aligned} \tag{5.72}$$

Prema sl. 5.26 je

$$\underline{I}_{T0}'' = \underline{I}_0''. \tag{5.73}$$

Iz (5.72) i (5.73) sledi, kada se ima u vidu (II.17),

$$\underline{I}_{Ta}'' = \underline{I}_{Tb}'' = \underline{I}_{Tc}'' = \underline{I}_0''. \tag{5.74}$$

Pri tom je (Tačka 1.1.1)

$$\underline{I}_0'' = \frac{1}{3}\underline{I}_z, \tag{5.75}$$

gde smo sa $\underline{I}_z$ označili struju jednofaznog zemljospoja.

Pošto, s obzirom na učinjene pretpostavke, u režimu bez zemljospoja kroz transformator za uzemljenje praktično ne teku struje, relacija (5.74) određuje ukupnu struju kroz transformator za vreme kvara. Iz navedenog sledi

$$\underline{I}_{Ta} = \underline{I}_{Tb} = \underline{I}_{Tc} = \frac{\underline{I}_z}{3}. \tag{5.76}$$

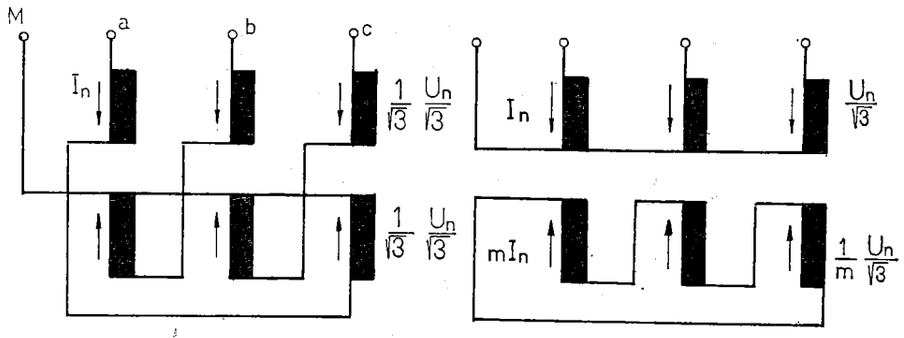
Struje tranformatora za uzemljenje pripadaju, kako se vidi, nultom redosledu, tako da imaju jednake vrednosti u sve tri faze (sl. 5.24).

Kod transformatora za uzemljenje sprega Z ili Yd nulta komponenta napona stvara neznatan fluks u magnetnom kolu, i ne utiče neposredno na dimenzionisanje magnetnog kola i izbor broja navojaka. Ona se, prema tome, može izostaviti pri određivanju instalisane snage transformatora. Pomenuta se snaga tako izračunava za normalni sistem napona mreže i struje (5.76). Ako se navedene veličine usvoje kao nazivne, što i treba za slučaj trajnog rada sa jednofaznim zemljospojem, naponsko-strujne prilike za proračun snaga transformatora sa spregama Z i Yd biće kao na sl. 5.27 i 5.28.

Kroz svaki polunavoj transformatora sa Z spregom protiče struja $I_n = I_z/3$ a na krajevima svih polunavoja imaće se napon $(1/\sqrt{3})\ U_n/\sqrt{3}$, ako se sa U_n označi nazivni napon distributivne mreže.

Kroz navoje svih faza namotaja spregnutog u zvezdu transformatora Yd takođe protiče struja $I_n = I_z/3$. Navoji faza moraće da budu dimenzionisani za napon $U_n/\sqrt{3}$. Ako se sa m označi odnos broja navojaka faza namotaja spregnutog u zvezdu i namotaja spregnutog u trougao, navoji trougla imaće m puta veće nazivne struje i m puta manje nazivne napone od navoja zvezde.

Instalisana snaga transformatora može se definisati kao zbir snaga svih navoja (polunavoja). Kod dvonamotajnih transformatora, međutim, obično se instalisanom snagom smatra polovina prethodne snage, pošto ova vrednost predstavlja



Sl. 5.27 Sl. 5.28

snagu koja se može preneti preko transformatora. Zadnju definiciju usvojićemo kao merodavnu i u ovoj prinlici i primenićemo je, radi poređenja, na oba tipa transformatora za uzemljenje.

Za transformator na sl. 5.27 biće

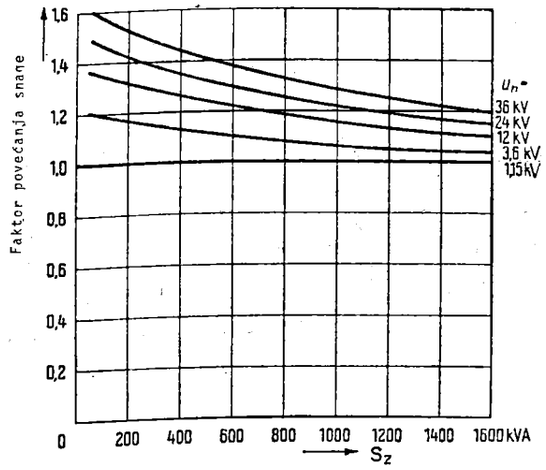
$$S_Z = \frac{1}{2}\,6\,\frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{U_n}{\sqrt{3}}\,I_n = U_n I_n. \tag{5.77}$$

Instalisana snaga transformatora sa spregom Yd je, saglasno sl. 5.28,

$$\begin{aligned} S_{Yd} &= \frac{1}{2}\left(3\,\frac{U_n}{\sqrt{3}}\,I_n + 3\,\frac{1}{m}\,\frac{U_n}{\sqrt{3}}\,mI_n\right) \\ &= \sqrt{3}\,U_n I_n \end{aligned} \tag{5.78}$$

Kako se vidi iz (5.77) i (5.78), nazivna snaga jednonamotajnog transformatora je za $\sqrt{3}$ puta manja od snage dvonamotajnog transformatora. Ovakav odnos se, međutim, ima samo kod nižih napona U_n. Pri naponima $U_n > 1{,}15$ kV kod jednonamotajnih transformatora potrebno je pojačati izolaciju namotaja prema magnetnom kolu usled čega dolazi do povećanih gabarita i troškova, koji odgovaraju većoj instalisanoj snazi. Faktori povećanja instalisane snage jednonamotajnih transformatora za različito U_n mreže prikazani su na sl. 5.29 u zavisnosti od idealne nstalisane snage (5.77) [45]. Ispravka snage (5.78) nije potrebna pošto se kod dvonamotajnih transformatora namotaj spregnut u trougao izvodi kao niženaponski sa $U_n \leq 1{,}15$ kV i stavlja do magnetnog jezgra, tako da problem izolacije prema masi

ne postoji. Potrebna izolacija između namotaja višeg i nižeg napona ostvaruje se bez većih teškoća i dodatnih ulaganja.



Sl. 5.29

5.5.2. INSTALISANA SNAGA ZA KRATKOTRAJNI POGON

Kod kratkotrajnog rada mogu se dozvoliti znatno veće gustine struje u navojima nego u trajnom pogonu, tako da se u istom odnosu smanjuju i instalisane snage.

Ako jednofazni zemljospoj ne traje duže od reda 30 s može se smatrati da se celokupna toplota oslobođena u provodnicima usled Džulovih gubitaka apsorbuje u provodnicima tj. da se ovi zagrevaju adijabatski, bez odvođenja toplote. Sa navedenom pretpostavkom dobijaju se unekoliko povišene, sigurne procene temperature.

Dozvoljena struja jednofaznog zemljospoja u razmatranim uslovima određuje se preko opšteg izraza (5.50) u kome se veličine na desnoj strani odnose na provodnike transformatora.

Za parametre c_s i R_s mogu se približno usvojiti vrednosti koje se imaju pri srednjim vrednostima temperature u razmatranom intervalu

$$\vartheta_s = \frac{1}{2}(\vartheta_0 + \vartheta_g). \tag{5.79}$$

Tako će se, saglasno (5.49), imati

$$R_s = R_{20}\,[1 + \alpha\,(\vartheta_s - 20°)]. \tag{5.80}$$

Ako se u (5.50) uvrsti R_s prema (5.80) i zameni

$$R_s = \rho_s \frac{l}{q}$$

$$m = \gamma\, lq,$$

gde je

ρ_s — srednja specifična otpornost provodnika,
γ — gustina materijala provodnika,
l, q — ukupna dužina i površina preseka provodnika, respektivno,

dolazi se do relacije

$$I^2 = q^2 \frac{\vartheta_g - \vartheta_0}{at}. \tag{5.81}$$

U relaciju (5.81) je uveden parametar

$$a \equiv \frac{\rho_s}{\gamma\, c_s}. \tag{5.82}$$

Prema (5.81), dozvoljena gustina struje pri kratkotrajnom pogonu kod koje se dostiže granična temperatura ϑ_g iznosi

$$\Delta_k = \frac{I}{q} = \sqrt{\frac{\vartheta_g - \vartheta_0}{at}}. \tag{5.83}$$

Transformator koji je izveden za trajnu gustinu struje Δ_t može da u kratkotrajnom pogonu radi sa Δ_k/Δ_t puta većom snagom budući da se struje kroz navoje odnose jednako kao gustine struja. Drugim rečima, transformator koji će kratkotrajno raditi sa strujom I_n može se dimenzionisati tako da ima Δ_k/Δ_t puta manju instalisanu snagu od one koja je potrebna za trajan rad sa istom strujom. Instalisana snaga transformatora za kratkotrajni rad može se, prema tome, odrediti na osnovu izraza

$$S_k = \varkappa\, S_t, \tag{5.84}$$

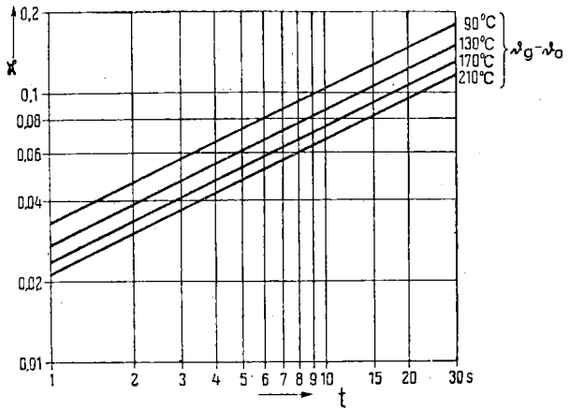
gde smo označili

$$\varkappa = \frac{\Delta_t}{\Delta_k} = \Delta_t \sqrt{\frac{at}{\vartheta_g - \vartheta_0}}. \tag{5.85}$$

U (5.84) je sa S_t označena instalisana snaga koju bi transformator trebalo da ima za slučaj trajnog rada sa strujom I_n, saglasno (5.77) i (5.78).

Sačinilac $\varkappa$ prikazan je na sl. 5.30 u vidu dijagrama za razne vrednosti dozvoljenih temperaturnih promena $\vartheta_g - \vartheta_0$ [45]. Krive su nacrtane za $a = 0{,}00741$ °C /s(A/mm²)², što odgovara provodnicima od bakra i $\Delta_t = 3{,}6$ A/mm².

Parametar a, kako se vidi iz (5.82), predstavlja fizičku konstantu materijala koja zavisi u izvesnoj meri od srednje vrednosti temperatura navoja. Vrednosti za a za različite temperature date su u Tabeli 5.1.



Sl. 5.30

TABELA 5.1

$0{,}5\,(\vartheta_g-\vartheta_0)$ °C	a °C s^{-1} $(A/mm^2)^{-2}$	
	Bakar	Aluminijum
140	0,00741	0,0165
160	0,00780	0,0174
180	0,00820	0,0183
200	0,00859	0,0191
220	0,00899	0,0200
240	0,00938	0,0209
260	0,00980	0,0218

5.5.3. KOMBINOVANO OPTEREĆENJE

Kod transformatora za uzemljenje sa više namotaja, u praktičnoj primeni često se postavlja pitanje o mogućnostima jednovremenog korišćenja za napajanje potrošača na nižem naponu. Trajno opterećenje transformatora ne sme da dovede do prekoračenja trajno dozvoljene temperature namotaja, kod normalnog stacionarnog pogona, a ni do prekoračenja kratkotrajno dozvoljene temperature namotaja kod superpozicije kratkotrajne struje zemljospoja na stacionarni režim.

Prvi od pomenutih kriterijuma, napisan analitički, glasi

$$\vartheta_t \leqslant \vartheta_{td}. \tag{5.86}$$

U (5.86) ϑ_t predstavlja temperaturu do koje se zagreva transformator u trajnom radu sa konstantnim opterećenjem koje se razmatra. Sa ϑ_{td} označena je trajno dozvoljena temperatura namotaja koja kod uljnih transformatora sa papirnom izolacijom (izolacija klase A) iznosi oko 85÷90 °C [113, 114].

Drugi uslov za dodatno stacionarno opterećivanje transformatora za uzemljenje može se približno prikazati relacijom

$$\vartheta_t + \Delta\vartheta \leqslant \vartheta_{kd}. \tag{5.87}$$

U (5.87) $\Delta\vartheta$ predstavlja porast temperature namotaja usled proticanja kratkotrajne struje, koji je usvojen pri projektovanju transformatora. Veličina $\Delta\vartheta$ prouzrokovana je u stvarnosti porastom gubitaka u bakru pri pojavi kombinovanog opterećenja, koji za jednu posmatranu fazu iznosi

$$\Delta P = \mathrm{R}\,|\,\underline{I}_t + \underline{I}_k\,|^2 - RI_t^2, \tag{5.88}$$

gde smo sa $\underline{I}_t$ i $\underline{I}_k$ označili trajnu i kratkotrajnu struju, respektivno. Kada su razmatrane struje u fazi, što je kritičan slučaj, iz (5.88) se dobija

$$\Delta P = R\,(I_k^2 + 2\,I_t\,I_k). \tag{5.89}$$

Ako je

$$I_k \gg I_t \tag{5.90}$$

iz (5.89) sledi

$$\Delta P \approx RI_k^2. \tag{5.91}$$

Relacija (5.91) opravdava usvojeni uprošćeni način određivanja $\Delta\vartheta$ u (5.87).

Sa ϑ_{kd} je u (5.87) označena kratkotrajno dozvoljena temperatura namotaja. Kod uljnih transformatora sa izolacijom klase A obično se graničnom smatraju temperature 250 °C za provodnike od bakra i 200 °C za provodnike od aluminijuma [114]. Navedeni podaci odnose se samo na vrlo retke kvarove, tako da bi se kod transformatora za uzemljenje mogle usvojiti nešto niže vrednosti.

Pošto su veličine ϑ_{kd} i $\Delta\vartheta$ poznate na osnovu projekta transformatora za uzemljenje, iz (5.87) može se odrediti ϑ_t. Manja od vrednosti ϑ_t iz (5.86) i (5.87) određuje maksimalno dozvoljeno zagrevanje transformatora pri trajnom opterećenju. Proračunom zagrevanja transformatora u stacionarnom pogonu može se ustanoviti pri kojoj struji I_t se postiže pomenuto zagrevanje. Nađena vrednost struje predstavljaće traženo maksimalno dozvoljeno trajno opterećenje transformatora za uzemljenje.

U praksi se često postavlja pitanje kolike kratkotrajne struje može da dozvoli obični energetski transformator kada se ovaj želi iskoristiti i kao transformator za uzemljenje. Dopustiva kratkotrajna opterećenja se i u posmatranom slučaju određuju uslovima zagrevanja.

Pošto je transformator projektovan kao energetski, u stacionarnom pogonu će se imati

$$\vartheta_t = \vartheta_{td}. \tag{5.92}$$

Na osnovu (5.92) iz (5.87) može se odrediti dozvoljeni porast temperature $\Delta\vartheta$ kod kombinovanog opterećenja. S obzirom na relaciju (5.81) koja daje vezu

između strujnog opterećenja i porasta temperature, kada se ima u vidu (5.89), može se pisati

$$I_k^2 + 2 I_t I_k = q^2 \frac{\Delta\vartheta}{at}. \tag{5.93}$$

Kako je

$$q = \frac{I_t}{\Delta_t},$$

u skladu sa (5.85) relacija (5.93) dovodi se na oblik

$$I_k^2 + 2 I_t I_k = \frac{I_t^2}{\varkappa^2}. \tag{5.94}$$

Rešavanjem jednačine (5.94) po I_k dobija se

$$I_k = I_t\left(\sqrt{1+\frac{1}{\varkappa^2}} - 1\right). \tag{5.95}$$

Nađena vrednost struje predstavlja dozvoljeno kratkotrajno preopterećenje transformatora.

Kako je obično $\varkappa \ll 1$, izraz (5.95) se može zameniti uprošćenim

$$I_k \approx \frac{I_t}{\varkappa}. \tag{5.96}$$

Relacije (5.95) i (5.96) izvedene su uz pretpostavku da je u toku kratkotrajnog opterećenja zagrevanje namotaja adijabatsko. Navedene relacije mogu se zato primeniti samo za proračun preopterećenja koja ne traju duže od reda 30 s. Kod dužih preopterećenja one bi davale preniske vrednosti.

Ustanovimo, primera radi, koliko se opterećenje I_k može dozvoliti u toku 5 s kod transformatora 10/0,4 kV sopstvene potrošnje, sprege *Zzo*, koji ima nazivnu snagu S_n=500 kVA. Namotaji su izrađeni od bakra.

Trajna struja transformatora je

$$I_t = \frac{500}{\sqrt{3}\cdot 10} = 289\ \text{A}.$$

Saglasno (5.92) i (5.87) može se dozvoliti $\Delta\vartheta$=130 °C. Temperatura koja će se dostići kod kombinovanog opterećenja iznosiće 90+130=220 °C<250 °C. Vrednostima ϑ_0=90 °C i ϑ_g=220 °C, koje će se imati u posmatranom slučaju, odgovara prema Tabeli 5.1 približno a=0,0078 °C s^{-1} (A/mm²)$^{-2}$. Za Δ_t=3,6 A/mm² dobija se, saglasno (5.85),

$$\varkappa = 3{,}6\sqrt{\frac{0{,}0078\cdot 5}{130}} = 0{,}062.$$

Dozvoljeno kratkotrajno opterećenje biće, prema (5.95),

$$I_k = 289\left(\sqrt{1+\frac{1}{0{,}062^2}} - 1\right) = 4381\ \text{A}.$$

Iz (5.96) bi se dobilo

$$I_k \approx \frac{289}{0{,}062} = 4661\ \text{A}.$$

U Tabeli 5.2 date su osnovne karakteristike transformatora koji se mogu primenjivati za kombinovano opterećenje [45].

Grupa A su transformatori namenjeni prvenstveno za uzemljenje mreže. Ovde se smatra da je snaga trajnog opterećenja dovoljno mala da ne umanji projektom predviđenu vrednost kratkotrajne struje, što se može proveriti toplotnim proračunom na ranije opisan način.

Grupu B predstavljaju transformatori koji su projektovani kao energetski. Čini se pretpostavka da su kratkotrajna opterećenja takva da ne zagrevaju transformator iznad graničnih temperatura, tj. ne prevazilaze prirodne rezerve koje ovaj ima u odnosu na kratkotrajna opterećenja. Provere ovakve vrste izvode se na način pokazan u prethodnom primeru.

TABELA 5.2

Primena	Nulta impedansa određena na primarnoj strani	Sprege i snage namotaja			Instalisana snaga transformatora
		primar	sekundar	kompenzacioni namotaj	
Pretežno za uzemljenje A	mala	$Z,\ 2\varkappa I_z U_n$	$Z,\ \frac{2}{\sqrt{3}}P$	—	$\varkappa I_z U_n + \frac{1}{\sqrt{3}}P$
	mala	$Z,\ 2\varkappa I_z U_n$	$Y,\ P$	$D,\ \frac{1}{3}P$	$\varkappa I_z U_n + \frac{2}{3}P$
	srednja do velika	$Y,\ \sqrt{3}\varkappa I_z U_n$	$Y,\ P$	$D,\ \sqrt{3}\varkappa I_z U_n$	$\sqrt{3}\varkappa I_z U_n + \frac{P}{2}$
	srednja do velika	$Y,\ \sqrt{3}\varkappa I_z U_n$	$Z,\ \frac{2}{\sqrt{3}}P$	$D,\ \sqrt{3}\varkappa I_z U_n$	$\sqrt{3}\varkappa I_z U_n + \frac{1}{\sqrt{3}}P$
Pretežno kao energetski B	mala	$Z,\ \frac{2}{\sqrt{3}}P$	$Z,\ \frac{2}{\sqrt{3}}P$	—	$\frac{2}{\sqrt{3}}P$
	mala	$Z,\ \frac{2}{\sqrt{3}}P$	$Y,\ P$	$D,\ \frac{1}{3}P$	$\frac{2+\sqrt{3}}{3}P$
	srednja do velika	$Y,\ P$	$Y,\ P$	$D,\ \frac{1}{3}P$	$\frac{7}{6}P$
	srednja do velika	$Y,\ P$	$Z,\ \frac{2}{\sqrt{3}}P$	$D,\ \sqrt{3}\varkappa I_z U_n$	$\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{\sqrt{3}}\right)P + \frac{\sqrt{3}}{2}\varkappa I_z U_n$

Primaran je onaj namotaj koji se koristi za uzemljenje mreže, a sekundaran, za napajanje potrošača na niskom naponu. Instalisana snaga određena je svođenjem transformatora na dvonamotajni. Sa P je označeno radno opterećenje sekundara.

Kod izbora transformatora za uzemljenje treba voditi računa i o jednofaznim zemljospojevima koji se uspostavljaju preko velikih prelaznih otpora na mestu kvara. Struje pomenutih zemljospojeva često su nedovoljno velike za aktiviranje zemljospojne zaštite, tako da mogu ostati neisključene, trajne. Trajna nazivna struja transformatora mora stoga biti bar jednaka minimalnom strujnom podešenju odgovarajuće zaštite.

5.5.4. PRIGUŠNICA ZA UZEMLJENJE

Kada napojni transformator ima neutralnu tačku na strani distributivne mreže, induktivno uzemljenje ostvaruje se priključenjem između neutralne tačke i zemlje podesno dimenzionisane prigušnice.

Prigušnica za uzemljenje izvodi se konstruktivno slično kao kompenzaciona prigušnica. Ona predstavlja jednofazni transformator sa jednim namotajem koji je tako dimenzionisan da mu je struja magnećenja jednaka željenoj struji jednofaznog zemljospoja. Potrebno velike struje magnećenja postižu se povećavanjem međugvožđa. Prigušnica za uzemljenje se, za razliku od kompenzacionih prigušnica, projektuje za kratkotrajni rad sa nazivnom strujom. Instalisana snaga prigušnice je stoga jednaka, u skladu sa (5.84),

$$S_{int} = \varkappa U_{np} I_{np}. \tag{5.97}$$

U (5.97) je sa U_{np} označen nazivni napon prigušnice koji je jednak nazivnom faznom naponu mreže

$$U_{np} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_n. \tag{5.98}$$

Struja I_{np} predstavlja nazivnu struju prigušnice koja se bira tako da bude jednaka željenoj vrednosti struje jednofaznog zemljospoja. Tako definisana struja određuje potrebnu vrednost reaktanse prigušnice i, isto kao kod otpornika, predstavlja dozvoljenu struju za kratkotrajni rad. Trajanje rada sa nazivnom strujom normira se od strane proizvođača i obično iznosi 5 do 10 s. Pomenuto vreme treba da bude usklađeno sa potrebama zemljospojne zaštite.

Nazivna reaktansa prigušnice jednaka je

$$X_n = \frac{U_{np}}{I_{np}}. \tag{5.99}$$

Sačiniocem $\varkappa$ uvažava se smanjenje instalisane snage usled kratkotrajnosti rada sa strujom I_{np}. Pomenuti sačinilac određuje se na način pokazan u 5.5.2.

Kako se vidi iz (5.97), instalisana snaga prigušnice za uzemljenje prema snazi kompenzacione prigušnice, pri istom U_{np} i I_{np}, stoji približno u odnosu $\varkappa : 1$, što znači da je bar 10 puta manja. Pošto kod uzemljenja preko male reaktanse po pravilu nije potrebna promena parametara I_{np} odnosno X_n, odgovarajuća prigušnica se izvodi bez regulacionog namotaja, što njenu konstrukciju čini sasvim jednostavnom i ekonomičnom.

Primera radi, za $U_n = 35$ kV, $I_{np} = 1000$ A i trajanje kvara 5 s, instalisana snaga prigušnice za uzemljenje bila bi, saglasno (5.97) i sl. 5.30, ako se usvoji $\Delta\vartheta = 170$ °C,

$$S_{in} \approx \frac{35}{\sqrt{3}} 1 \cdot 0{,}05 = 1{,}01 \text{ MVA}.$$

Po dimenzijama prigušnica bi odgovarala približno jednofaznom dvonamotajnom transformatoru snage 500 kVA.

Trajno dozvoljena struja prigušnice jednaka je, saglasno (5.84),

$$I_t = \varkappa I_{np}. \tag{5.100}$$

Pomenuta struja je po pravilu dosta veća od vrednosti koje se postižu kod otpornika za uzemljenje, što se može smatrati pozitivnom karakteristikom prigušnice.

Iz izvedene analize može se zaključiti da prigušnica ima izvesnih prednosti u odnosu na otpornike, koje dolaze do izražaja naročito kod viših nazivnih napona mreže i većih struja zemljospoja. Ona ima manji gabarit a ne zahteva ni poseban smeštaj, kontrolu i održavanje.

Oblasti primene uzemljenja preko male reaktanse ograničene su pitanjima efikasnosti suzbijanja tranzijentnih prenapona pri nastanku zemljospoja, kao i uslovima za pojavu prenapona pri manipulacijama isključivanja u mreži.

5.6. OPASNI UTICAJI NA TELEKOMUNIKACIONE VODOVE

Kod uzemljenja neutralne tačke preko male impedanse, kroz zemlju, u slučaju jednofaznog zemljospoja, teku znatne struje. Pomenute struje mogu da prouzrokuju opasne napone na provodnicima telekomunikacionih vodova koji se vode paralelno elektroenergetskim vodovima ili su položeni u elektroenergetskim postrojenjima odnosno u njihovoj neposrednoj blizini

5.6.1. NAPONI NA PROVODNICIMA TELEKOMUNIKACIJA PRI PARALELNOM VOĐENJU SA ELEKTROENERGETSKIM VODOM

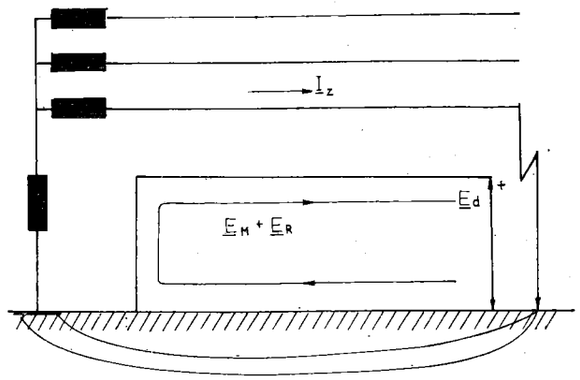
Kada se telekomunikacioni vod polaže paralelno energetskom vodu, e. m. s. koja će se indukovati u konturi koju obrazuje telekomunikacioni vod sa tlom kod zemljospoja na energetskom vodu može se izračunati kao (sl. 5.31)

$$\underline{E}_M = -j\omega M l \underline{r} \underline{I}_z \tag{5.101}$$

U (5.101) je označeno

$\underline{I}_z$ — struja zemljospoja,
l — dužina paralelnog vođenja,
M — međusobna induktivnost energetskog i telekomunikacionog provodnika po jedinici dužine paralelnog vođenja,
$\omega = 2\pi f$,
$f = 50$ Hz — učestanost struje zemljospoja.

Sačinilac $\underline{r}$ predstavlja redukcioni faktor kojim se obuhvata uticaj drugih paralelnih uzemljenih provodnika kao što su omotači kablova, zaštitni provodnici vazdušnih vodova, metalni cevovodi, šine i drugi uzemljeni delovi. Način određivanja pomenutog sačinioca obrađen je u 5.6.2 i 5.6.3. Sl. 5.31 nacrtana je uz pretpostavku da pored energetskog i telekomunikacionog voda nema drugih paralelnih uzemljenih provodnika, čemu u (5.101) odgovara $\underline{r}=1$.



Sl. 5.31

Parametar M predstavlja međusobnu induktivnost dvaju električnih kola sa paralelnim provodnicima i povratnim putevima struja kroz zemlju. Ova je induktivnost složena funkcija međusobnog rastojanja paralelno vođenih provodnika, specifične otpornosti tla i učestanosti, kako je to pokazano u radovima Karsona (Carson), Polačeka (Pollaczek) i Ridenberga (Rüdenberg) [3, 5].

Iz formula Karsona se, posle izvesnih uprošćenja, prihvatljivih u praktičnim proračunima, za induktivnost M dobija [5]

$$M=\frac{\mu}{2\pi}\ln\frac{a'}{a}+\frac{\mu}{2\pi}\ln\frac{D_e}{a'}, \tag{5.102'}$$

odakle sledi

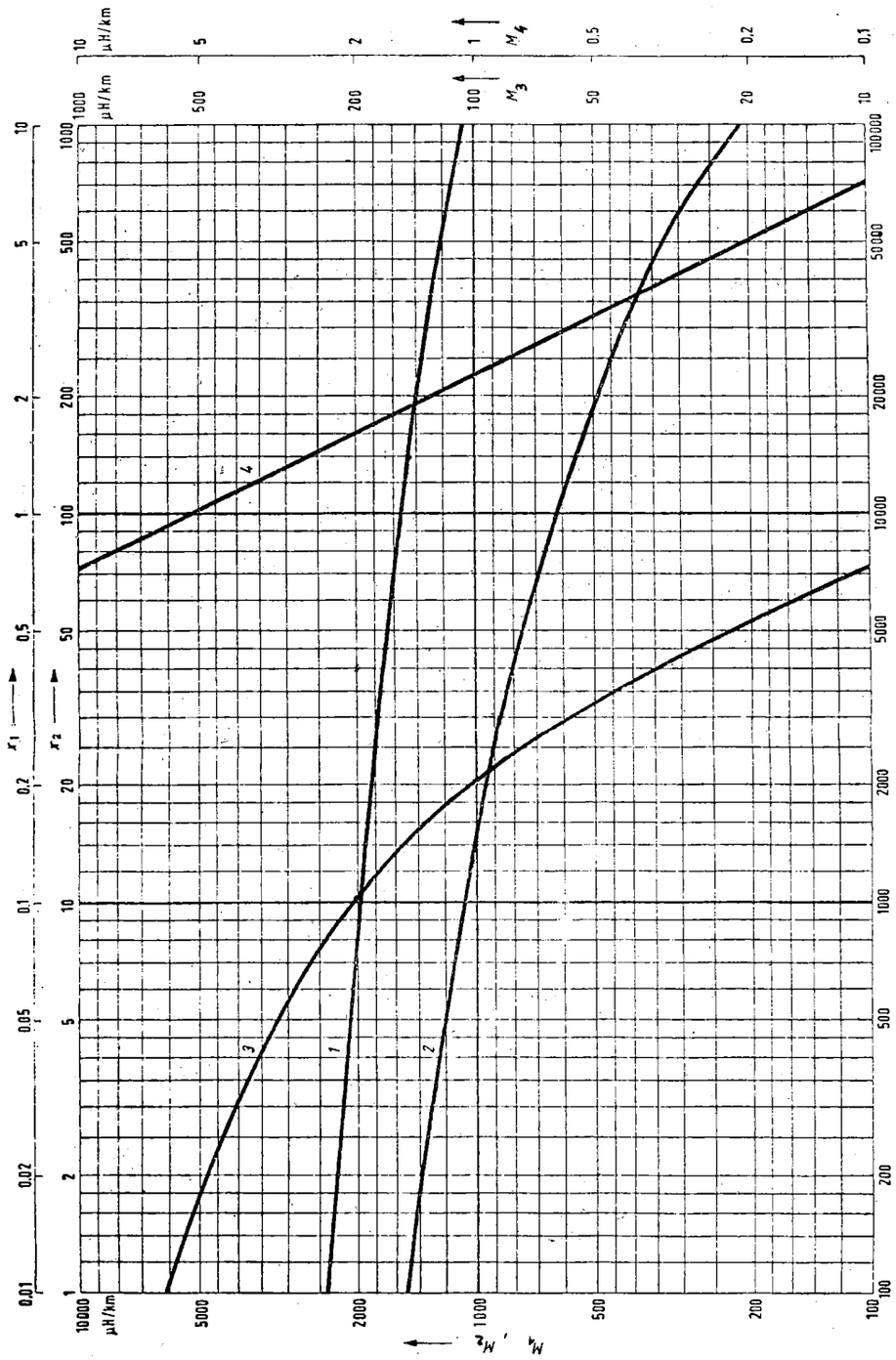
$$M=\frac{\mu}{2\pi}\ln\frac{D_e}{a}. \tag{5.102}$$

U (5.102') i (5.102) su

$$D_e=658\sqrt{\frac{\rho}{f}}, \tag{5.103}$$

ρ — specifična otpornost tla,
a — međusobno rastojanje paralelno vođenih provodnika,
a' — međusobno rastojanje provodnika energetskog voda i lika telekomunikacionog provodnika u odnosu na površinu tla,
μ — magnetni parameabilitet vazduha i tla
($\mu\approx\mu_0=4\pi\,10^{-7}$ H/m).

Parametar D_e predstavlja rastojanje između provodnika i ekvivalentnog fiktivnog provodnika kojim se zamenjuje uticaj povratnih struja u tlu.



Sl. 5.32

Preko prvog člana u (5.102′) izračunava se e. m. s. indukovana u provodniku telekomunikacionog voda, a preko drugog, e. m. s. indukovana na površini tla.

Na sl. 5.32 dati su dijagrami vrednosti M u funkciji parametra

$$x = a\sqrt{10\frac{f}{\rho}}. \tag{5.104}$$

Između paralelnih provodnika energetskog i telekomunikacionog voda postoji i izvesna konduktivna sprega usled zajedničkog povratnog puta struja kroz zemlju. E. m. s. koja se uspostavlja na tlu usled pomenute sprege jednaka je

$$\underline{E}_R = -R_z\, l\, \underline{r}\, \underline{I}_z. \tag{5.105}$$

Međusobna otpornost posmatranih kontura provodnika može se izračunati, na osnovu rezultata Karsona i Ridenberga [5], kao

$$R_z = \frac{1}{4}\mu\pi f = \frac{\mu\omega}{8} \tag{5.106}$$

sa istim značenjem oznaka kao ranije. Relacije (5.102) i (5.106) daju dovoljno tačne vrednosti samo kada je $a \ll D_e$. Ovi su slučajevi, međutim, i najinteresantniji za praksu.

Rezultanta e. m. s. koja se uspostavlja u kolu telekomunikacioni provodnik — zemlja jednaka je, u skladu sa (5.101) i (5.106),

$$\underline{E}_m = \underline{E}_R + \underline{E}_M = -\underline{Z}_m\, \underline{r}\, \underline{I}_z. \tag{5.107}$$

U (5.107) je sa $\underline{Z}_m$ označena međusobna impedansa posmatranih paralelno vođenih kola

$$\underline{Z}_m = R_z\, l + j\,\omega\, Ml. \tag{5.108}$$

Za $f=50$ Hz i $\mu=\mu_0$ ima se

$$\underline{Z}_m = \left(0{,}0493 + j\,0{,}1445 \log\frac{D_e}{a}\right) l,$$

pri čemu je

$$D_e = 93{,}3\sqrt{\rho}.$$

Ako je jedan od krajeva telekomunikacionog provodnika u kontaktu sa tlom, na drugom, slobodnom kraju se uspostavlja u odnosu na zemlju potencijalna razlika Ed koja se može premostiti dodirom (sl. 5.31). Pomenuta potencijalna razlika može da, ako je dovoljno velika, prouzrokuje opasne električne udare a i oštećenja aparature.

Kako je (sl. 5.31)

$$\underline{E}_d = \underline{E}_R + \underline{E}_M,$$

saglasno (5.107) i (5.108) ima se

$$E_d = \sqrt{E_R^2 + E_M^2} = \sqrt{R_z^2 + (\omega M)^2}\, lr\, I_z. \tag{5.109}$$

Ako do dodira dođe van oblasti paralelnog vođenja, u tlu na mestu dodira neće postojati pad napona usled proticanja struje I_z, tako da će saglasno (5.102′) biti

$$\underline{E}_d = -j\,\omega\frac{\mu}{2\pi}\ln\frac{a'}{a}\,\underline{r}\,\underline{I}_z. \tag{5.110}$$

U najvećem broju slučajeva od praktičnog značaja je $E_R \ll E_M$ tako da se uticaj E_R obično zanemaruje.

Prema preporukama CCITT e. m. s. E_M, kod brzog isključivanja zemljospojeva, ne bi trebalo da bude veća od 430 V.

Na osnovu (5.101) može se odrediti granična dužina paralelnog vođenja energetskog i telekomunikacionog voda za određeno rastojanje a

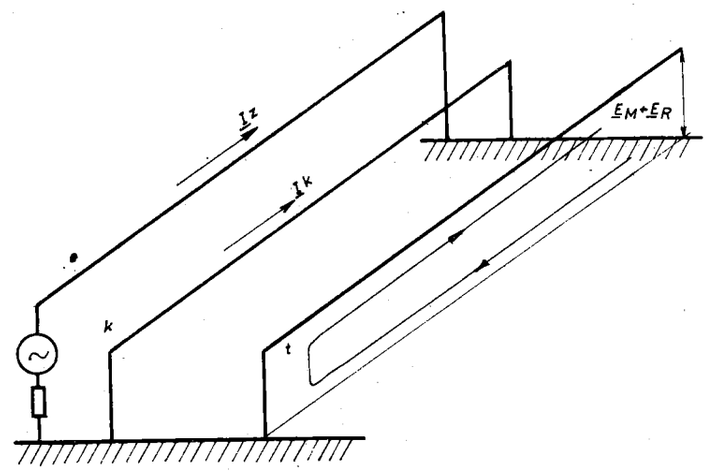
$$l_g = \frac{E_g}{\omega\, Mr\, I_z}. \tag{5.111}$$

U (5.111) je sa E_g označena granično dozvoljena indukovana e. m. s. E_M.

Primera radi, neka je $a=0{,}5$ m, $\rho=100$ Ωm, $I_z=300$ A i $r=0{,}5$. Na osnovu (5.104) izračunava se $x=1{,}12$, čemu prema sl. 5.32 odgovara $M \approx 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ H/km. Iz (5.111) se za dozvoljenu dužinu paralelnog vođenja dobija $l_g \approx 10$ km. Kako pretpostavljeni uslovi odgovaraju kablovskim gradskim mrežama, gde su dužine paralelnog vođenja obično male, može se zaključiti da u gradskim mrežama kod struja zemljospoja reda 300 A ne treba očekivati nikakve opasne uticaje. Za $\rho=1000$ Ωm uz iste ostale uslove, dobilo bi se $l_g \approx 8{,}3$ km, što pokazuje da je uticaj specifične otpornosti tla na indukovanu e. m. s. mali.

5.6.2. REDUKCIONI FAKTOR

Uticaj metalnih delova u tlu na e. m. s. E_m objasnićemo na primeru prikazanom na sl. 5.33. Na slici je sa »e« označen provodnik energetskog voda, sa »t« provodnik telekomunikacionog voda, a sa »k« paralelni metalni provodnik u tlu, uzem-



Sl. 5.33

ljen na oba kraja. Provodnik »k« može da predstavlja metalni omotač jednog od kablova, cevovod, šine i sl.

Struja u provodniku »k« usled delovanja provodnika »e« određuje se iz uslova ravnoteže e. m. s.

$$0=\underline{Z}_{ek}\,\underline{I}_z+\underline{Z}_k\,\underline{I}_k$$

iz koga sledi

$$\underline{I}_k=-\frac{\underline{Z}_{ek}}{\underline{Z}_k}\,\underline{I}_z. \tag{5.112}$$

Sa $\underline{Z}_{ek}$ je označena međusobna impedansa provodnika energetskog voda i provodnika »k« koja se može odrediti prema (5.108). Ako je provodnik »k« plašt energetskog kabla, međusobna impedansa mora da obuhvati i otpore rasprostranjenja uzemljenja na krajevima kabla, pošto su ovi zajednički za konture koje sa zemljom grade provodnik i plašt. U pomenutom slučaju će biti

$$\underline{Z}_{ek}=\underline{Z}_m+R_{uz} \tag{5.113}$$

gde je sa R_{uz} označen zbir otpornosti uzemljenja na krajevima.

Parametar $\underline{Z}_k$ predstavlja sopstvenu impedansu provodnika »k«. Ona je za provodnike kružnog preseka jednaka (na primer, [40, 47]),

$$\underline{Z}_k=R_{1k}+R_z\,l+j\,\omega\left(\frac{\mu_1}{8\pi}+\frac{\mu_2}{2\pi}\ln\frac{D_e}{r_k}\right)l. \tag{5.114}$$

U (5.114) R_{1k} predstavlja otpornost provodnika »k« koja obuhvata i prelazne otpore uzemljenja na krajevima. Sa R_z označena je otpornost povratnog puta kroz tle po jedinici dužine, koja se poklapa sa otpornošću R_z prema (5.106).

Prvi član u zagradi u (5.114) predstavlja sopstvenu induktivnost provodnika od magnetnog fluksa koji se obrazuje unutar provodnika, a drugi član sopstvenu induktivnost konture provodnik — zemlja od spoljašnjeg fluksa. Sa μ_1 i μ_2 označene su magnetne permeabilnosti provodnika i vazduha i tla, respektivno, a D_e je ekvivalentno rastojanje do povratnog toka struje u tlu koje se računa prema (5.103). Sa r_k označen je poluprečnik provodnika.

Ako je $\mu_1=\mu_2=\mu$, izrazu (5.114) može se dati oblik

$$\underline{Z}_k=R_k+j\,\omega\left(\frac{\mu}{2\pi}\ln\frac{D_e}{r_k'}\right)l, \tag{5.115}$$

gde je označeno

$$R_k=R_{1k}+R_z\,l, \tag{5.116}$$

$$r_k'=0{,}78\,r_k. \tag{5.117}$$

Za $f=50$ Hz i $\mu=\mu_0$ izraz (5.115) dobija oblik

$$\underline{Z}=R_k+j\,0{,}1445\,l\log\frac{D_e}{r_k'}. \tag{5.118}$$

E. m. s. u konturi telekomunikacioni vod — tle biće jednaka (sl. 5.33)

$$\underline{E}_m=-\underline{Z}_{et}\,\underline{I}_z-\underline{Z}_{kt}\,\underline{I}_k. \tag{5.119}$$

U (5.119) su

$\underline{Z}_{et}$ — međusobna impedansa energetskog i telekomunikacionog voda

$\underline{Z}_{kt}$ — međusobna impedansa provodnika »k« i telekomunikacionog voda.

Pomenute impedanse izračunavaju se prema (5.108) odnosno (5.113).

Ako se u (5.119) struja $\underline{I}_k$ izrazi preko (5.112), posle sređivanja dobija se

$$\underline{E}_m=-\underline{Z}_{et}\,\underline{r}\,\underline{I}_z, \tag{5.120}$$

gde smo označili

$$\underline{r}=1-\frac{\underline{Z}_{kt}\,\underline{Z}_{ek}}{\underline{Z}_{et}\,\underline{Z}_k}. \tag{5.121}$$

Formula (5.120) je u punom skladu sa (5.117). Izraz (5.121) daje vrednost redukcionog faktora usled uticaja provodnika »k«.

Kako se vidi, redukcioni faktor ima povoljne, niske vrednosti kada je provodnik »k« vrlo blizu energetskom ili telekomunikacionom kablu. U prvom slučaju bi se imalo

$$\underline{Z}_{kt}\approx\underline{Z}_{et},\ \underline{Z}_k\approx\underline{Z}_{ek}, \tag{5.122}$$

a u drugom

$$\underline{Z}_{ek}\approx\underline{Z}_{et},\ \underline{Z}_k\approx\underline{Z}_{kt} \tag{5.122a}$$

Ako je provodnik »k« provodni omotač energetskog kabla ili zaštitni provodnik vazdušnog energetskog voda, iz (5.121) se dobija, s obzirom na (5.122),

$$\underline{r}=\frac{\underline{Z}_k-\underline{Z}_{ek}}{\underline{Z}_k}. \tag{5.123}$$

Za kablovski vod je, pošto su provodnik i omotač vezani za ista uzemljenja na krajevima, a plašt kabla je dovoljno tanak da se može zanemariti reaktansa usled fluksa unutar plašta (relacije (5.114) i (5.113)),

$$\underline{Z}_k-\underline{Z}_{ek}=R_p. \tag{5.124}$$

U (5.124) je sa R_p označena otpornost plašta.

Na osnovu (5.123), (5.124) i (5.114) se za kablovski vod dobija:

$$r=\frac{R_p}{\sqrt{(R_{1k}+R_z\,l)^2+(X_k\,l)^2}}, \tag{5.125}$$

pri čemu je

$$X_k=\frac{\omega\mu_0}{2\pi}\ln\frac{D_e}{r_k}=0{,}1445\log\frac{D_e}{r_k}\quad\Omega/\text{km}. \tag{5.126}$$

U (5.126) r_k predstavlja srednji poluprečnik plašta. Učinjena je pretpostavka da je plašt izveden od nemagnetnog materijala.

Formula (5.125) može se primeniti kod kablova koji nemaju mehaničku zaštitu od čeličnih traka, čiji se uticaj mora posebno uvažiti.

Odredimo redukcioni faktor za kabl sa sintetičkom izolacijom tipa XHP 48 za 11,6/20 kV, preseka 3×95 mm², koji ima bakarni plašt 16 mm² sa srednjim poluprečnikom $r_k\approx15$ mm. Neka je $\rho=50$ Ωm i $R_{1k}\approx R_p$.

Prema (5.103) ima se

$$D_e = 658 \cdot \sqrt{\frac{50}{50}} = 658 \text{ m},$$

tako da je, saglasno (5.126),

$$X_k = 0{,}1445 \log \frac{658}{0{,}015} = 0{,}67 \ \Omega/\text{km}.$$

Za $r_p = \frac{R_p}{l} = 1{,}11$ Ω/km, koliko odgovara preseku plašta, iz (5.125) se izračunava,

$$r = \frac{1{,}11\, l}{\sqrt{(1{,}11 + 0{,}0493)^2\, l^2 + (0{,}67\, l)^2}} = 0{,}83.$$

Za presek plašta od 25 mm², u istim uslovima, dobija se $r=0{,}70$.

U slučaju da se na mestima uzemljenja kabla ima prelazna otpornost $R_{uz}=1$ Ω, za $l=1$ km kod plašta preseka 16 mm² postiže se $r=0{,}48$, a kod preseka 25 mm², $r=0{,}38$.

Kod vazdušnog energetskog voda, budući da do zemljospojeva po pravilu dolazi na stubovima, uzemljenja zaštitnog i faznog provodnika na krajevima su zajednička kao i kod kabla.

Na osnovu (5.108), (5.113) i (5.114) tako se dobija

$$\underline{Z}_k - \underline{Z}_{ek} = R_{1k} + R_z\, l + j\frac{\omega\mu_0}{2\pi} l \left(\ln \frac{D_e}{r_k} + \frac{\mu_r}{4}\right) - (R_{uz} + R_z\, l)$$

$$- j\frac{\omega\mu_0}{2\pi} l \ln \frac{D_e}{a}$$

$$= R_{zu}\, l + j\frac{\omega\mu_0}{2\pi} l \left(\ln \frac{a}{r_k} + \frac{\mu_r}{4}\right). \tag{5.127}$$

U (5.127) je sa μ_r označen relativni magnetni permeabilitet zaštitnog provodnika, a sa $R_{zu}\, l = R_{1k} - R_{uz}$, njegova otpornost. Parametar a predstavlja srednje geometrijsko rastojanje zaštitnog i faznih provodnika, pošto je pretpostavljeno da je na vodu izvedeno preplitanje faza.

Pomenuti parametar se izračunava kao

$$a = \sqrt[3]{d_a\, d_b\, d_c}, \tag{5.128}$$

gde su sa d_a, d_b i d_c označena rastojanja zaštitnog provodnika od odgovarajućih faznih provodnika na jednoj od deonica preplitanja.

S obzirom na (5.123) i (5.127), redukcioni faktor usled zaštitnog provodnikajednak je, ako se l izrazi u km,

$$r = \sqrt{\frac{(R_{z\prime}\, l)^2 + (0{,}1445\, l)^2 \left(\log \frac{a}{r_k} + 0{,}11\, \mu_r\right)^2}{(R_{1k} + R_{z\prime}\, l)^2 + (0{,}1445\, l)^2 \left(\log \frac{D_e}{r_k} + 0{,}11\, \mu_r\right)^2}} \tag{5.129}$$

Formula (5.129) može se primeniti na bilo koji uzemljeni metalni provodnik ako je ovaj znatno bliži energetskom nego telekomunikacionom vodu, tako da važi prvi od odnosa u (5.122).

Ako posmatrani provodnik nema zajednička uzemljenja sa faznim provodnikom u kvaru, iz $\underline{Z}_{ek}$ izostaje R_{uz} pa u brojiocu u (5.129) R_{zu} treba zameniti sa R_{1k}.

U Tabeli 5.3 date su vrednosti redukcionog faktora za vazdušne vodove sa različitim vrstama zaštitnih provodnika [20]. Podaci se odnose na vodove sa $a \leqslant 10$ m i važe za specifičnu otpornost tla 50 Ωm. Vrednosti iz tabele menjaju se zavisno od ρ tla u opsegu ±10%, kod svih navedenih materijala. Izuzetno, za zaštitne provodnike od čelika ove su razlike u opsegu ±2%. Kod lošije provodnog tla parametar D_e ima veće vrednosti, tako da se, saglasno (5.129), redukcioni faktor smanjuje.

TABELA 5.3

Vrsta zaštitnog provodnika	Uže aluminijum — čelik prema DIN 48204			Uže od bronze		Uže od čelika		Uže čelik-bakar (40%)	
Presek mm²	300/50	240/40 (185/32)*	44/32	50	70	50	70	50	70
Otpor za jednosmernu struju, Ω/km	0,093	0,115 (0,145)	0,518	0,473	0,345	3,020	2,310	0,813	0,586
Otpor za naizmeničnu struju,** Ω/km, 50 Hz	0,10	0,116 (0,15)	0,59	0,52	0,37	4,13	2,50	0,86	0,61
Redukcioni faktor	0,61	0,62	0,77	0,75	0,69	0,99	0,98	0,84	0,78

* presek nije obuhvaćen DIN — normama.

** kod užadi od čelika ili sa čeličnim jezgrom zavisi od struje.

Lako se zaključuje da izraz (5.125) važi i za metalni omotač telekomunikacionog voda. Isto se tako i formula (5.129) može primeniti za zaštitni provodnik telekomunikacionog voda.

U slučaju kada oba posmatrana voda imaju zaštitne provodnike ili plašteve, rezultujući redukcioni faktor može se približno izračunati kao

$$r = r_e\, r_t. \tag{5.130}$$

Ovde su r_e i r_t redukcioni faktori energetskog i telekomunikacionog kabla, računati odvojeno, saglasno ranije dobijenim izrazima.

Ako postoje i drugi metalni provodnici u tlu, osim plašteva i zaštitnih provodnika razmatranih vodova, rezultantni redukcioni faktor može se takođe proceniti prema formuli

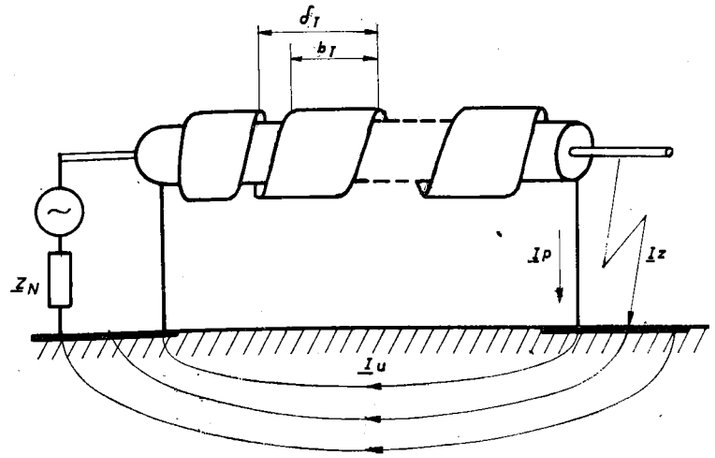
$$r = \prod_{i=1}^{n} r_i. \tag{5.131}$$

gde su sa r_i označeni pojedinačni faktori za uzemljene provodnike, koji se određuju prema opštoj relaciji (5.121).

Formula (5.131) je približna i ne važi kada uzemljeni provodnici leže jedan blizu drugog. Tačna vrednost redukcionog faktora dobija se analizom celog sistema provodnika kao skupa spregnutih kola, koristeći isti postupak koji je primenjen za izračunavanje redukcionog faktora kod prisustva jednog uzemljenog provodnika.

5.6.3. REDUKCIONI FAKTOR KABLOVA SA ARMATUROM

Na sl. 5.34 prikazan je energetski kabl koji preko provodnog plašta ima zaštitnu armaturu koja se sastoji od pljosnatih čeličnih traka spiralno uvijenih oko kabla. Ovakvih traka može da bude više od jedne (najčešće dve), tako da se namataju jedna na drugu. Čelične trake su na krajevima kabla spojene sa provodnim plaštom i vezane za uzemljenje postrojenja.



Sl. 5.34

Čelična armatura nalazi se, kako se vidi sa sl. 5.34, u kolima provodnika i plašta koje ovi delovi obrazuju sa povratnim putevima struje kroz zemlju, usled čega se povećavaju impedanse $\underline{Z}_k$ i $\underline{Z}_{ek}$.

Impedansa plašta jednaka je, u posmatranim uslovima,

$$\underline{Z}_k = R_{1k} + R_z\, l + j\, X_k\, l + \underline{Z}_a\, l \tag{5.132}$$

gde je

$$R_{1k} = R_{pa} + R_{uz} \tag{5.133}$$

Parametri R_z i X_k imaju iste vrednosti kao u (5.125).

Parametar R_{pa} predstavlja ekvivalentnu otpornost plašta i armature

$$R_{pa} = \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_a}\right)^{-1}. \tag{5.134}$$

Otpornost armature može se izračunati kao

$$R_a = \rho_{Fe} \frac{l_{Fe}}{q_{Fe}}, \tag{5.135}$$

gde je l_{Fe} dužina a q_{Fe} ukupni presek trake. Pri tom je, saglasno sl. 5.34,

$$l_{Fe} = \pi d_a \frac{l}{\delta_T} \tag{5.136}$$

$$q_{Fe} = n\, b_T\, d_T. \tag{5.137}$$

U (5.136) i (5.137) su:

d_a — srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake,
δ_T — korak uvijanja trake,
n — broj traka,
b_T — širina trake,
d_T — debljina trake.

S obzirom na (5.136) i (5.137), iz (5.135) se dobija

$$R_a = \rho_{Fe} \frac{\pi d_a \xi}{n b_T^2 d_T} l, \tag{5.138}$$

pri čemu je označeno

$$\xi = \frac{b_T}{\delta_T}. \tag{5.139}$$

Parametar ξ je obično reda 0,75 [64].

Impedansa $\underline{Z}_a\, l$ u (5.132) posledica je magnetnog uticaja armature. Ona zavisi od vrednosti magnetnog polja koja se uspostavlja u armaturi.

Pomenuto polje može se približno izračunati kao (sl. 5.34)

$$\underline{H}_a = \frac{\underline{I}_z - \underline{I}_p}{\pi d_a} = \frac{\underline{I}_u}{\pi d_a}, \tag{5.140}$$

gde je sa I_u označena struja koja se odvodi preko zemlje, mimo kabla.

Kako je poznato (na primer, [65]), ukupni uticaji jezgra od magnetnog materijala na električno kolo koje ga obuhvata, mogu se, kada se radi samo sa osnovnim harmonicima veličina električnog kola, prikazati kompleksnim magnetnim permeabilitetom

$$\mu_a \equiv \mu_a' - j\,\mu_a'' = \mu_0\,(\mu_{ra}' - j\,\mu_{ra}'') \tag{5.141}$$

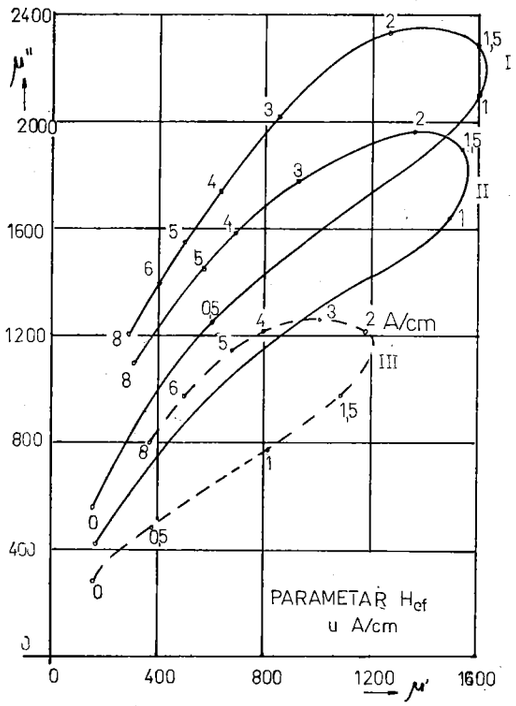
Parametar μ_a'' odražava gubitke u magnetnom materijalu usled Fukolovih struja i histerizisa, a μ_a' induktivni uticaj.

Na sl. 5.35 prikazana je grafički, primera radi, zavisnost $\mu_{ra}' = f(\mu_{ra}'')$ za visokožareni čelik za različite vrednosti H_a [115].

Kriva *I* odnosi se na trake debljine 0,3 do 0,5 mm pri 16 2/3 Hz i 0,3 mm pri 50 Hz. Kriva *II* važi za trake debljine 0,8 mm pri 16 2/3 Hz i 0,5 mm za 50 Hz. Kriva *III* dobijena je za trake debljine 0,8 mm za 50 Hz.

Kompleksni magnetni fluks kroz armaturu može se izračunati prema izrazu

$$\underline{\Phi}_a = \underline{\mu}_a \underline{H}_a q_{Fe}. \quad (5.142)$$



Sl. 5.35

Impedansa $\underline{Z}_a\, l$ preko koje se u strujnim kolima obuhvata delovanje magnetne armature, jednaka je

$$\underline{Z}_a\, l = \frac{j\omega \underline{\Phi}_a}{\underline{I}_u} \quad (5.143)$$

ili, s obzirom na (5.137), (5.140) i (5.142)

$$\underline{Z}_a\, l = j\,\underline{\mu}_a \frac{\omega}{\pi d_a} n\, \xi\, d_T\, l. \quad (5.144)$$

Kada se ima u vidu (5.141) i (5.144), može se definitivno napisati

$$\underline{Z}_a\, l = r_a\, l + j\, x_a\, l, \quad (5.145)$$

gde smo označili

$$r_a = \mu_a'' \frac{\omega_n \xi}{\pi d_a} d_T, \quad (5.146)$$

$$x_a = \mu_a' \frac{\omega_n \xi}{\pi d_a} d_T. \quad (5.147)$$

Redukcioni faktor kabla sa armaturom izračunava se, prema tome, u skladu sa (5.123) i (5.132), primenom izraza

$$r = \frac{R_{pa}}{\sqrt{(R_{1k} + R_Z\, l + r_a\, l)^2 + (X_k + x_a)^2\, l^2}} \quad (5.148)$$

sa istim značenjem parametara kao ranije.

Struja $\underline{I}_u$, merodavna za proračun magnetnog polja u armaturi kabla jednaka je (sl. 5.34)

$$\underline{I}_u = \underline{I}_z - \underline{I}_p = \left(1 - \frac{\underline{I}_p}{\underline{I}_z}\right) \underline{I}_z. \quad (5.149)$$

Kako je, međutim, u skladu sa (5.112) i usvojenim smerovima struja,

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{Z}_{ek}}{\underline{Z}_k} \underline{I}_z,$$

iz (5.149) i (5.123) sledi

$$\underline{I}_u = \left(1 - \frac{\underline{Z}_{ek}}{\underline{Z}_k}\right) \underline{I}_z = \underline{r}\, \underline{I}_z. \quad (5.150)$$

Budući da se struja $\underline{I}_u$ odvodi kroz tlo na krajevima kabla, redukcioni faktor, kako se vidi iz (5.150), važan je i sa gledišta dimenzionisanja uzemljenja postrojenja.

Na osnovu izvedenih relacija može se za svaki kabl određenih konstruktivnih karakteristika, ako se poznaju magnetna svojstva čelika zaštitnih traka, utvrditi zavisnost $r = f(I_z)$. Postupak proračuna pomenute zavisnosti sastoji se iz više koraka. Prvo se usvaja vrednost H_a i prema njoj sa dijagrama $\mu_{ra}' = f(\mu_{ra}'')$ očitavaju odgovarajuće vrednosti oba permeabiliteta. Tada se primenom (5.132) do (5.134) i (5.146) do (5.148) izračunava redukcioni faktor r, koji se ima pri pretpostavljenom magnetnom polju. S obzirom na (5.140) i (5.150). struja I_z koja odgovara nađenom r može se odrediti iz izraza

$$\underline{I}_z = \pi\, d_a \frac{H_a}{r}. \quad (5.151)$$

Tako je utvrđena jedna tačka tražene zavisnosti. Druge tačke razmatrane funkcije nalaze se istom procedurom za nove vrednosti H_a, koje se biraju tako da sa željenim korakom rastu od najmanjih do najvećih praktično mogućih vrednosti.

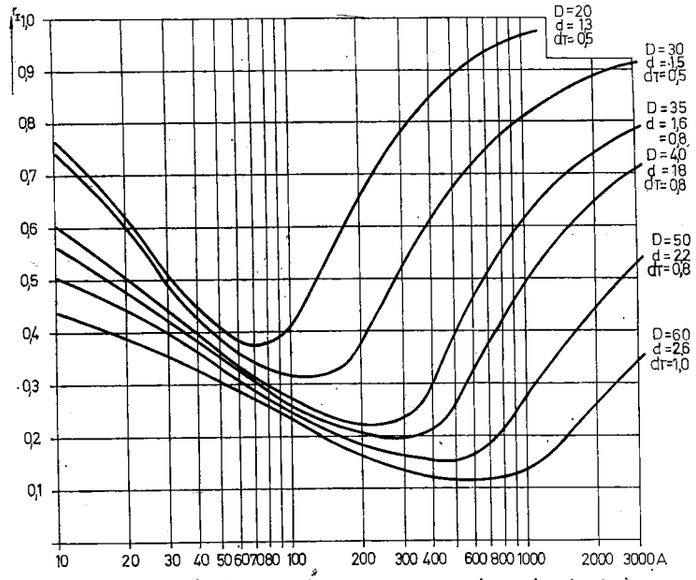
Na sl. 5.36 i 5.37 prikazana je zavisnost $r = f(I_z)$ za kablove sa olovnim plaštom i dve zaštitne čelične trake, dobijena proračunima [80]. Prva od pomenutih slika odnosi se na kablove sa zajedničkim plaštom, a druga, na kablove sa zasebnim olovnim plaštevima za svaki provodnik.

Sa D je označen spoljni prečnik plašta, d je debljina plašta, a d_T debljina jedne čelične trake. Krive su računate uz zanemarenje otpornosti uzemljenja plašta na oba kraja.

U Tabeli 5.4 navedeni su rezultati merenja raspodele struja kod jednofaznog zemljospoja na kablu IPO-13 3×95 mm^2 koja su izvedena u mreži 10 kV u Beogradu [78]. Struje su merene petljastim oscilografima na način opisan u tački 5.2.3. Kablovi IPO-13 su pojasni, sa zajedničkim olovnim omotačem i dva sloja čelične trake. Raspodela struja merena je pri različitim strujama zemljospoja koje su podešavane promenama uklopnih stanja mreže, kao i promenama otpornosti otpornika za uzemljenje neutralne tačke.

TABELA 5.4

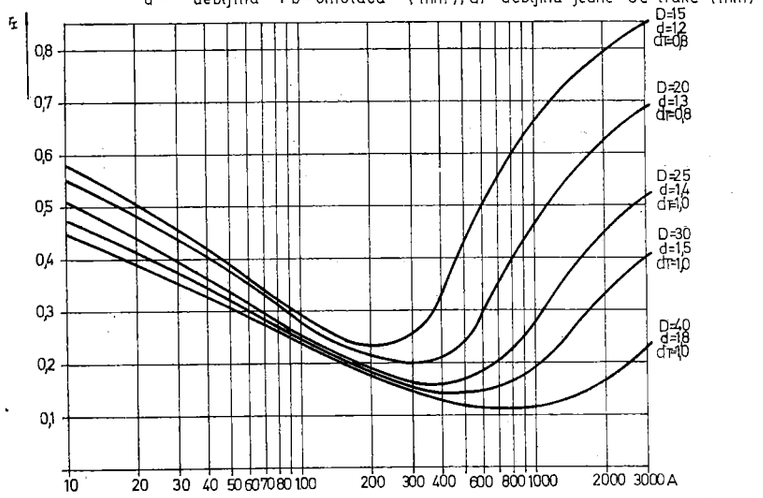
struje A			redukcioni faktor
I_z	I_p	I_u	
50,9	41,3	16	0,315
87	76	21	0,241
102	87	23	0,226
318	279	51,8	0,163
346	306	59	0,171
488	430	127	0,261
510	455	135	0,264



Sl. 5.36 Redukcioni faktor r_I u zavisnosti od struje zemljospoja za kablove sa jednim olovnim omotačem dva sloja čelične trake

D– prečnik preko Pb – omotača (mm)

d – debljina Pb-omotača (mm); dT– debljina jedne Če trake (mm)



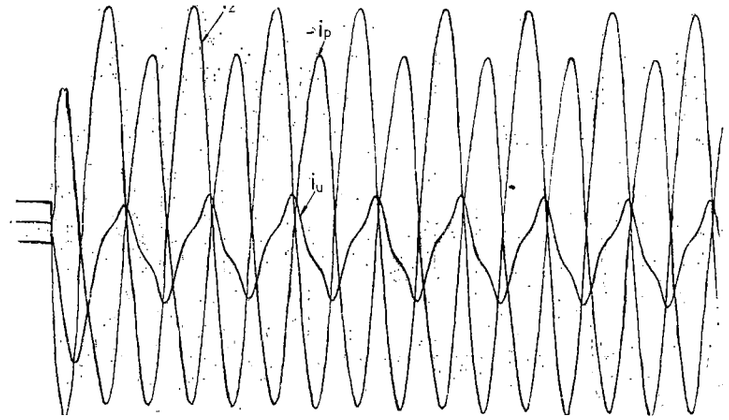
Sl. 5.37 Redukcioni faktor r_z u zavisnosti od struje zemljospoja za troolovne kablove sa dva sloja čelične trake.

D– prečnik preko Pb– omotača (mm)

d – debljina Pb-omotača (mm); dT– debljina jedne Če trake (mm)

Kako se vidi, ustanovljena zavisnost vrednosti redukcionog faktora i struje zemljospoja po svom karakteru vrlo je bliska tokovima krivih na sl. 5.37.

Na sl. 5.38 prikazan je, ilustracije radi, oscilogram struja i_z, i_p, i_u u eksperimentu sa I_z=488 A.



Sl. 5.38

Priloženi oscilogram pokazuje da je struja i_u u odnosu na struju zemljospoja skoro čisto induktivna, što je posledica uticaja velikih vrednosti reaktanse $x_a\,l$. Zaista, kompleksni redukcioni faktor u (5.150) ima, kada je

$$(X_k+x_a)\,l \gg R_{1k}+(r_z+R_a)\,l,$$

argument blizak $-\dfrac{\pi}{2}$. Izobličenje toka struje i_u prouzrokovano je zasićenjem čeličnih traka armature koje kod maksimalnih vrednosti i_u smanjuje reaktansu x_a.

Struja i_p je praktično u fazi sa i_z pošto prolazi kroz plašt kabla ne obuhvatajući se sa armaturom.

Formula (5.148) može se primeniti i za proračun redukcionog faktora telekomunikacionog kabla sa zaštitnom armaturom. Kod telekomunikacionog kabla je, međutim, srednje magnetno polje H_a određeno samo strujom kroz plašt, budući da kroz provodnike kabla ne teče struja (sl. 5.39)

$$H_a=\frac{I_p}{\pi\, d_a}. \tag{5.152}$$

Kada plašt kabla nije na krajevima u kontaktu sa uzemljenjem energetskog voda, u (5.148) treba R_{pa} zameniti sa R_{k1}.

Karakterističnom veličinom za telekomunikacioni kabl obično se smatra e. m. s. koja bi se pojavila u konturi provodnik kabla — tlo kada ne bi postojao uzemljeni plašt. Efektivna vrednost ove e. m. s. jednaka je

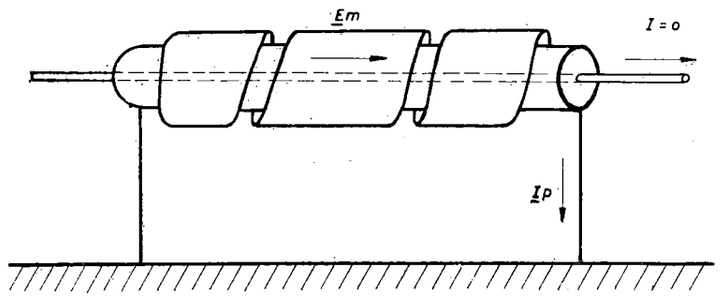
$$E_{m0}=Z_{et}\,I_z. \tag{5.153}$$

Između e. m. s. E_{m0} i stvarne e. m. s. E_m postoji, saglasno (5.120) i (5.153) veza

$$\frac{E_m}{E_{m0}}=r. \tag{5.154}$$

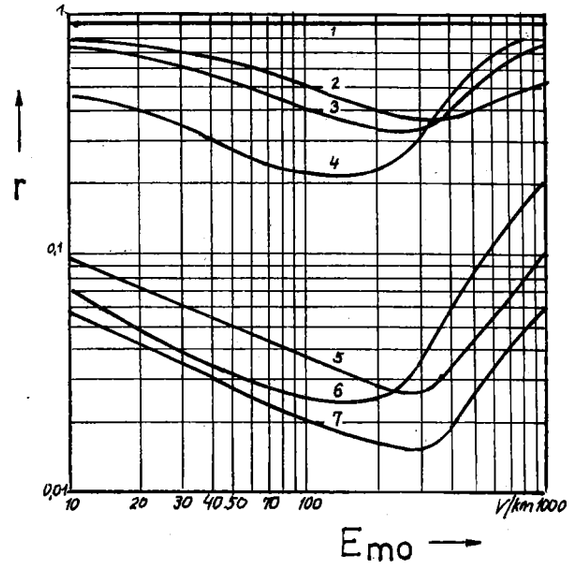
Struja I_p jednaka je, kada se ima u vidu (5.112), (5.123), (5.153) i (5.148) (uz zamenu R_{pa} sa R_{k1}),

$$I_p = \frac{E_{m0}}{Z_k} = \frac{r\,E_{m0}}{R_{k1}}. \tag{5.155}$$



Sl. 5.39

Relacija (5.155) može poslužiti za utvrđivanje zavisnosti $r=f(E_{m0})$ za telekomunikacione kablove, koja je vrlo podesna za praktičnu primenu. Navedena zavisnost izračunava se istim postupkom kao i funkcija $r=f(I_z)$ kod energetskog kabla. Jedina razlika je u tome što se posle nalaženja r, sada na osnovu usvojenog H_a i relacija (5.152) i (5.155), izračunava e. m. s. E_{m0}. Tako se dobijaju sve tačke tražene zavisnosti.



Sl. 5.40

Na sl. 5.40 prikazane su karakteristike $r=f(E_{m0})$ za telekomunikacione kablove sa različitim plaštevima i armaturama [46].

Dijagrami se odnose na kablove sa spoljnim prečnikom ispod plašta 30 mm. Kriva 1 daje redukcioni faktor kada kabl ima plašt od plastičnog materijala, a armaturu od čelične pljosnate žice debljine 0,8 mm. Visoke vrednosti r kod opisane konstrukcije posledice su znatne aktivne otpornosti armature.

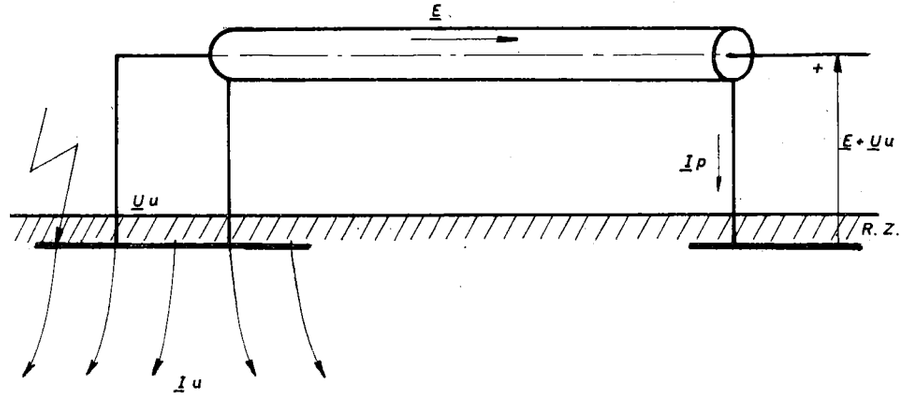
Kriva 2 odnosi se na kabl sa plaštom od legure čelika (»STAHLWELL«) i armaturom od dva sloja pljosnatih traka 0,8 mm od normalnog čelika.

Kriva 3 pokazuje analiziranu zavisnost za kabl sa olovnim plaštom i dva sloja trake 0,5 mm od normalnog čelika, a kriva 4, za isti kabl kada su trake izrađene od specijalnog, visokožarenog čelika.

Naročito povoljni redukcioni faktori imaju se u slučaju primene plašteva od aluminijuma. Kriva 5 odnosi se na kabl sa plaštom od aluminijuma debljine 1,6 mm i dva sloja trake od normalnog čelika 0,8 mm. Još niži redukcioni faktori dobijaju se kada se armatura, umesto sa normalnim čelikom, izvede sa dva sloja traka od specijalnog čelika debljine 5 mm (kriva 6), odnosno 8 mm (kriva 7).

5.6.4. NAPON NA PROVODNIKU TELEKOMUNIKACIONOG VODA POD UTICAJEM UZEMLJENJA ELEKTROENERGETSKIH POSTROJENJA

Kod polaganja telekomunikacionih vodova u elektroenergetskim postrojenjima ili njihovoj neposrednoj blizini često se ima situacija prikazana na sl. 5.41.



Sl. 5.41

Provodnici telekomunikacionog kabla su u kontaktu na određeni način sa uzemljenjem postrojenja. Plašt i armatura kabla takođe su vezani za uzemljenje postrojenja i uzemljeni su i na drugom svom kraju, koji se nalazi van potencijalne zone uzemljivača postrojenja.

U slučaju da drugi kraj provodnika kabla nije uzemljen, između ovog kraja i okolnih uzemljenih delova javiće se, pri zemljospojevima u elektroenergetskom postrojenju, potencijalne razlike koje se mogu premostiti dodirom. Pomenuta potencijalna razlika može se, u skladu sa sl. 5.41, izračunati kao

$$\underline{E}_u = \underline{U}_u + \underline{E} \tag{5.156}$$

U (5.156) je sa $\underline{U}_u$ označen napon na koji dolazi uzemljivač u odnosu na udaljeno tlo na nultom potencijalu (»referentna zemlja«) ili, kraće, »napon uzemljivača«.

Pomenuti napon je jednak

$$\underline{U}_u = R_u \underline{I}_u \tag{5.157}$$

gde je R_u otpor rasprostiranja uzemljivača, a $\underline{I}_u$ struja koja se odvodi u zemlju preko uzemljivača u slučaju razmatranog zemljospoja u elektroenergetskoj mreži.

Sa $\underline{E}$ označena je e. m. s. koja se pojavljuje u kolu provodnik — zemlja telekomunikacionog kabla usled proticanja struje kroz plašt. Ova se e. m. s. može izračunati, na osnovu razmatranja u 5.6.2, kao

$$\underline{E} = -\underline{Z}_{tk} \underline{I}_p, \tag{5.158}$$

pri čemu je

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{U}_u}{\underline{Z}_k}. \tag{5.159}$$

S obzirom na (5.156) do (5.159), ima se

$$\underline{E}_u = R_u \underline{I}_u \left(1 - \frac{\underline{Z}_{tk}}{\underline{Z}_k}\right). \tag{5.160}$$

Izraz u zagradi ne predstavlja ništa drugo nego redukcioni faktor kabla, kako se vidi iz (5.123), tako da se definitivno dobija

$$\underline{E}_u = \underline{r}\, R_u \underline{I}_u. \tag{5.161}$$

Kod proračuna opasnih napona pri jednovremenom uticaju paralelnog vođenja i uzemljenja postrojenja treba voditi računa o faznoj pomerenosti e. m. s. $\underline{E}_u$ i $\underline{E}_m$.

6. UZEMLJENJE I UZEMLJIVAČI

6.1. KARAKTERISTIČNE VELIČINE UZEMLJIVAČA

Osnovna uloga uzemljivača je da odvede u tle struje koje se javljaju kod zemljospojeva u mreži, tako da se na tlu unutar i van postrojenja ne pojave naponi koji bi mogli da ugroze život ljudi i životinja.

Pored navedenog, uzemljenje treba da ima i malu prelaznu otpornost prema tlu (»otpornost rasprostiranja«) kako bi se zadržale dovoljno velike vrednosti struje kvara za delovanje odgovarajuće zaštite, ako je ova predviđena.

Osnovna karakteristika uzemljivača je potencijalna razlika dodira. Ona predstavlja maksimalnu potencijalnu razliku koju čovek može premostiti dodirom uzemljenog objekta. Matematički izraz za pomenutu potencijalnu razliku mogao bi biti oblika

$$E_d = V_u - V_{0\,\min} \tag{6.1}$$

gde je V_u potencijal na koji dolazi uzemljeni objekat pri odvođenju struje kvara, a V_0 min minimalni potencijal tla oko objekta sa koga se ovaj može dohvatiti rukom. Pri tom se smatra da je najveće odstojanje sa koga može doći do dodira 1 m.

Pošto je posmatrani objekat direktno vezan za uzemljivač, veličina V_u predstavlja ujedno i potencijal uzemljivača.

Očigledno je da potencijalna razlika dodira zavisi ne samo od raspodele potencijala na površini tla nad uzemljivačem već i od razmeštaja opreme i drugih delova koji se uzemljuju u postrojenju u odnosu na uzemljivač. Da bi se pojednostavilo projektovanje, za uzemljivač se obično određuje potencijalna razlika

$$E_m = V_u - V_{\min} \tag{6.2}$$

gde $V_{\min}$ predstavlja apsolutni minimum potencijala tla nad uzemljivačem na celoj površini postrojenja. Potencijalna razlika E_m zavisi isključivo od raspodele potencijala, odnosno od oblika i dimenzija uzemljivača i električnih karakteristika tla.

Kako je

$$V_{\min} \leqslant V_{0\,\min} \tag{6.3}$$

iz (6.1) i (6.2) sledi

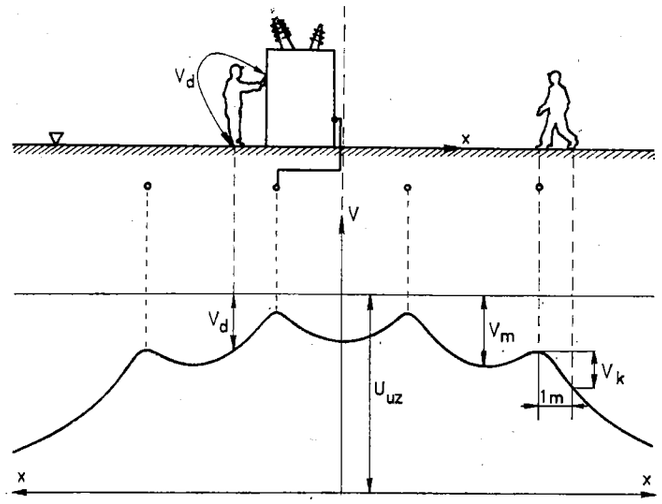
$$E_d \leqslant E_m. \tag{6.4}$$

U realnim uslovima E_d može biti i par desetina procenata manje od E_m, tako da se pri projektovanju uzemljivača uz uslov da veličina E_m zadovolji propise, ostvaruje određena rezerva na strani sigurnosti.

Pored E_d, za uzemljenje je karakteristična i maksimalna potencijalna razlika koja se može premostiti korakom E_k. Pri tom se obično smatra da dužina koraka nije veća od 1 m.

Potencijalna razlika koraka zavisi isključivo od raspodele potencijala na površini tla.

Na sl. 6.1 prikazana je skica jednog mrežastog uzemljivača i raspodela potencijala na površini tla duž pravca koji polovi ivično polje. Pomenuti pravac može se smatrati najkritičnijim za uzemljivač jer se na njemu imaju praktično najveće potencijalne razlike dodira i koraka. Na dijagramu raspodele potencijala pokazane su sve karakteristične potencijalne razlike. E_m ima svoje maksimalne vrednosti u blizini sredine ugaonog okca uzemljivača, a E_k u blizini ivice uzemljivača, sa spoljne strane.



Sl. 6.1

Otpornost rasprostiranja uzemljivača definisana je odnosom

$$R_u = \frac{V_u}{I_u}$$

ili

$$R_u = \frac{U_u}{I_u} \tag{6.5}$$

gde je sa I_u označena struja koja se sa uzemljivača odvodi u tlo, a sa U_u napon uzemljivača. Budući da se definiše kao potencijalna razlika prema »referentnoj zemlji«, odnosno delovima na nultom potencijalu, napon U_u se poklapa sa V_u.

Otpornost R_u kako se vidi iz (6.5), značajna je pored ostalog i zbog toga što određuje visinu potencijala na koji će kod kvara doći uzemljivač i, tako, i potencijal koji se može izneti iz postrojenja kablovima i drugim metalnim delovima u tlu.

Stvarni napon kojem se izlaže čovek prilikom dodira, manji je od E_d za pad napona na prelaznoj otpornosti tlo — stopalo, usled ograničene površine kontakta. Pomenuta otpornost može se smatrati približno jednakom otpornosti rasprostiranja kružne ploče

$$R_s = \frac{\rho}{2 D_e} \tag{6.6}$$

sa prečnikom

$$D_e \approx 0{,}16 \text{ m}. \tag{6.7}$$

U (6.6) je sa ρ označena specifična električna otpornost tla.

Za dodir kao na sl. 6.1 kada pogođena osoba stoji sa sastavljenim stopalima, prelazna otpornost biće upola manja od (6.6). Napon kojem će čovek biti izložen pri dodiru može se, saglasno ekvivalentnoj šemi sa sl. 6.2, izračunati kao

$$U_d = \frac{E_d}{s_d}, \tag{6.8}$$

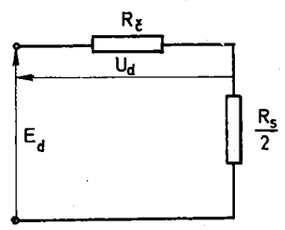
gde je označeno

$$s_d \equiv 1 + \frac{R_s}{2 R_č}. \tag{6.9}$$

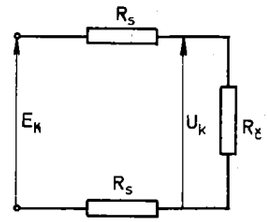
Parametar $R_č$ predstavlja otpor čovekovog tela na putu noge — ruka. Obično se za $R_č$ usvaja vrednost između 1000 i 3000 Ω, nezavisno od puta prolaza struje kroz tlo. U novije vreme sve se češće kao merodavna prihvata niža od navedenih vrednosti [36], kako je to ranije usvojeno preporukama AIEE [81].

Za $R_č = 1000\ \Omega$ se za s_d dobija, s obzirom na (6.6), (6.7) i (6.9),

$$s_d \approx 1 + 1{,}56\ \rho\ 10^{-3} \tag{6.10}$$



Sl. 6.2



Sl. 6.3

Napon koji se uspostavlja između stopala čoveka kada se korakom premosti potencijalna razlika E_k određuje se, saglasno sl. 6.3, preko izraza

$$U_k = \frac{E_k}{s_k}, \tag{6.11}$$

pri čemu je s_k sačinilac kojim se obuhvata uticaj prelaznih otpornosti stopala

$$s_k \equiv 1 + 2\frac{R_s}{R_{\check{C}}}. \tag{6.12}$$

S obzirom na (6.6) i (6.7), izraz (6.12) za $R_{\check{C}}=1000\ \Omega$ postaje

$$s_k = 1 + 6{,}25\ \rho\ 10^{-3}. \tag{6.13}$$

6.2. KRITERIJUMI OPASNOSTI OD ELEKTRIČNOG UDARA

Opasnost od električnog udara zavisi, kako su mnoga ispitivanja na ljudima i životinjama pokazala, od nekoliko osnovnih činilaca: vrste struje (naizmenična, jednosmerna, impulsna), njene vrednosti i učestanosti (ako je naizmenična), dužine trajanja udara i puta prolaska kroz telo. U daljim ćemo se razmatranjima, s obzirom na predmet našeg interesovanja, ograničiti na opisivanje uticaja naizmenične struje 50 (60) Hz.

Efekti struje električnog udara na čovečiji organizam različiti su zavisno od vrednosti struje. Na osnovu velikog broja eksperimenata na ljudima i životinjama kao i rekonstrukcija pojedinih nesrećnih slučajeva, može se dati orijentaciona klasifikacija pomenutih uticaja, prikazana u tabeli 6.1 [82, 86, 93, 116, 8, 91]. Efekti se odnose na slučaj električnog udara na putu ruka—ruka ili ruka—noga. Podaci u tabeli važe za zdrave osobe, prosečne konstitucije.

TABELA 6.1

Efektivna vrednost struje električnog udara (mA)	DEJSTVO
<1	Ne oseća se
1—9	Blage bezbolne reakcije; moguća je voljna kontrakcija mišića i oslobađanje od dela pod naponom.
10—20	Grčenje mišića i bolovi u rukama i grudima; oslobađanje od delova pod naponom najčešće nije moguće; posle prekida proticanja struje organizam ostaje bez posledica.
20—50	Veliki bolovi; snažna kontrakcija mišića; otežano disanje.
50—100	U slučaju trajnijeg delovanja moguća ventrikularna fibrilacija srca.
100—500	Fibrilacija vrlo verovatna.
>500	Opekotine na mestima dodira; opšti mišićni tonus sprečava pojavu fibrilacije.

Kako se vidi, struje udara manje od 10 mA po pravilu nisu opasne pošto omogućavaju voljno odvajanje od dela pod naponom, bez posledica.

Granične struje pri kojima može da dođe do otpuštanja uhvaćenog kontakta pod naponom, tzv. »let go — current«, ustanovljene su eksperimentima na većem broju osoba od strane Dalcila (Dalziel) [116].

Izvedena merenja pokazala su da približno 90% muškaraca može da otpusti provodnik pri strujama manjim od 12,5 mA, a 50% pri strujama manjim od oko 16 mA (15,87 mA). Kod ispitivanih žena ove su struje iznosile 8, odnosno 10,5 mA.

Struje u opsegu 10—50 mA, moraju se smatrati opasnim to više što su bliže gornjoj granici, budući da se usled grčenja mišića pogođena osoba u većini slučajeva neće moći da odvoji od napona i tako će biti izložena trajnijem delovanju struje. Kod dugog delovanja struja razmatranih vrednosti dolazi do asfikcije (obamrlosti, prestanka disanja), gubitka svesti i smrti [116]. Trajnijom primenom veštačkog disanja i masažom srca odmah posle odvajanja od napona, pogođeno lice se često može povratiti bez posledica. Kod struje reda 50 mA do gubitka svesti i gušenja dolazi već u toku nekoliko minuta [91].

U opsegu 50—500 mA dolazi, kod dovoljno duge izloženosti udaru, do acikličkog nekoordinisanog treperenja srčanih zalisaka — »ventrikularne fibrilacije«, usled koje se blokira rad srca i prestaje cirkulacija krvi. Spontano reaktiviranje srca nakon prestanka proticanja struje je neizvesno i malo verovatno. Veštačko disanje i masaža srca na licu mesta obično ne pomažu već je potrebna brza specijalistička intervencija i defibrilacija srca elektrošokovima. Pošto vitalni nervni centri ne mogu da ostanu bez krvi više od nekoliko minuta, fibrilacija u najvećem broju slučajeva dovodi do smrti.

U cilju utvrđivanja maksimalnih struja koje ne izazivaju fibrilaciju, u zavisnosti od trajanja električnog udara, izvedeno je od strane više autora niz ispitivanja na životinjama. Eksperimenti Dalcila, Kiseljeva, Kouvenhovena (Kouwenhoven), Ferisa (Ferris) pokazali su da se maksimalne vrednosti struje pri kojima ne dolazi do fibrilacije mogu proceniti preko relacije

$$I = \frac{K}{\sqrt{t}}\,\text{mA} \tag{6.14}$$

koja važi za

$$0{,}03\ s \leqslant t \leqslant 3\ s. \tag{6.15}$$

U [82] je za konstantu K utvrđena vrednost

$$K = 165\ \text{mA} \tag{6.16}$$

koja je usvojena i u preporukama AIEE [81]. U [83] je predložena, posle uvažavanja novih eksperimentalnih rezultata, nešto niža vrednost

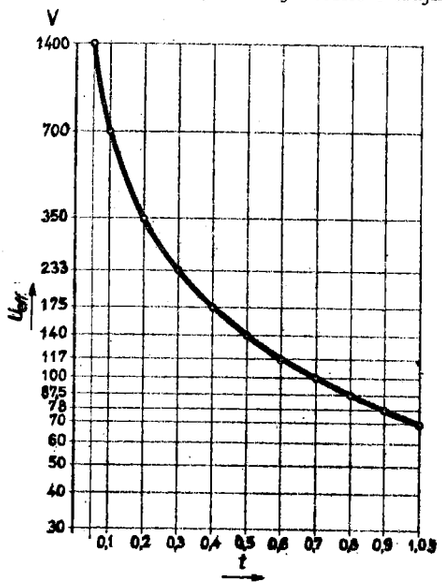
$$K = 116\ \text{mA}. \tag{6.17}$$

Ovu vrednost usvajaju i nove preporuke IEEE [120].

Na sl. 6.4 prikazane su granične vrednosti razmatranih struja prema eksperimentima Osipk-e (Osypka) uzetih za osnovu novih propisa u SR Nemačkoj i Švajcarskoj [84].

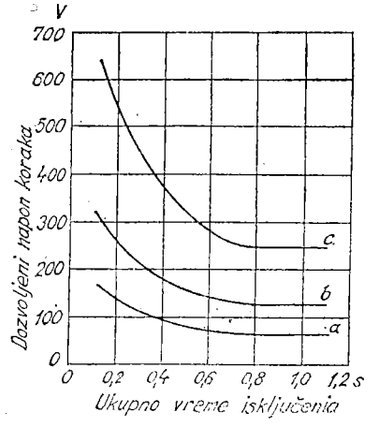
Navedeni dijagram za udare duže od oko 0,35 s daje osetno niže, a za udare kraće od 0,35 s, znatno više vrednosti od izraza (6.14) sa K prema (6.17).

Kod struja udara iznad 500 mA obično, usled opšteg mišićnog tonusa, ne dolazi do fibrilacije ali se na mestima dodira stvaraju opasne opekotine i zatrovanja što, iako ne mora da dovede do smrti, ostavlja teške i trajne posledice.



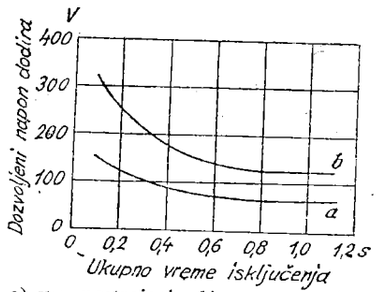
Sl. 6.4

Na osnovu utvrđenih graničnih vrednosti bezopasnih struja udara normiraju se dozvoljene vrednosti karakterističnih veličina uzemljivača i uzemljenja uopšte. Radi jednostavnosti praktičnih proračuna obično se ne propisuju granične struje



a) na javnim putevima, b) na ostalim mestima, c) u postrojenju ako se koristi izolaciona obuća

Sl. 6.5

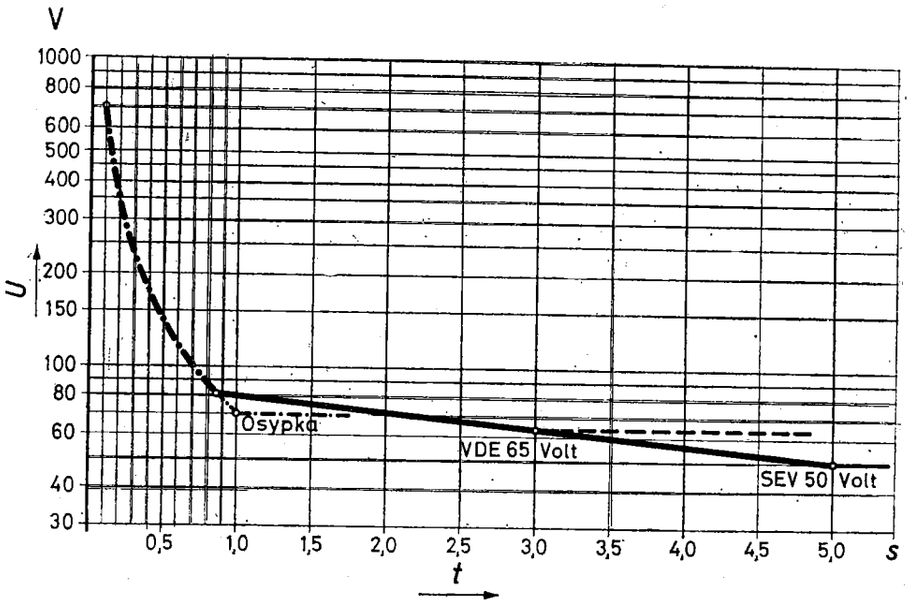


a) van postrojenja, b) u postrojenju

Sl. 6.6

električnog udara već dozvoljeni naponi, koji se dobijaju množenjem pomenutih struja sa usvojenom vrednošću otpornosti čovekovog tela.

Na sl. 6.5 i 6.6 prikazani su dijagrami dozvoljenih napona koraka i dodira prema važećim jugoslovenskim propisima [85], koji odgovaraju ranijim VDE preporukama. Dozvoljeni naponi se određuju prema vremenima delovanja prvog stepena zaštite, bez uvažavanja mogućnosti otkaza. Prikazane krive zasnovane su na formuli (6.14) sa K prema (6.16) uz uvažavanje niza nepovoljnih okolnosti, tako da sadrže znatnu rezervu sigurnosti. Treba imati u vidu da su krive na sl. 6.5 normirane tako da ne dozvole, ne fibrilaciju, nego pad pogođene osobe, kako bi se izbeglo naknadno premošćenje visokih potencijala pri eventualnom ponovnom uključenju [86]. Kod mreža bez automatskog ponovnog uključenja pomenute su krive očigledno prestroge.



Sl. 6.7

Na sl. 6.7 pokazana je kriva dozvoljenih napona dodira prema novim VDE preporukama, kao i kriva prema švajcarskim propisima [36, 84]. Isprekidano izvučeni deo krive, koji je zajednički za oba navedena propisa, izračunat je iz krive graničnih struja na sl. 6.4 za $R_č = 1000\ \Omega$. Puno izvučena prava prikazuje švajcarske propise. VDE preporuke usvojile su deo pomenute prave do napona 65 V i ovaj napon dozvoljavaju nadalje kod svih vremena trajanja kvara. Oba propisa ne zahtevaju proračun napona koraka, polazeći od pretpostavke da je ovaj po pravilu manji od napona dodira, a inače i manje opasan.

Američki propisi dozvoljene napone dodira i koraka određuju prema (6.14) i (6.16) takođe sa $R_č = 1000\ \Omega$.

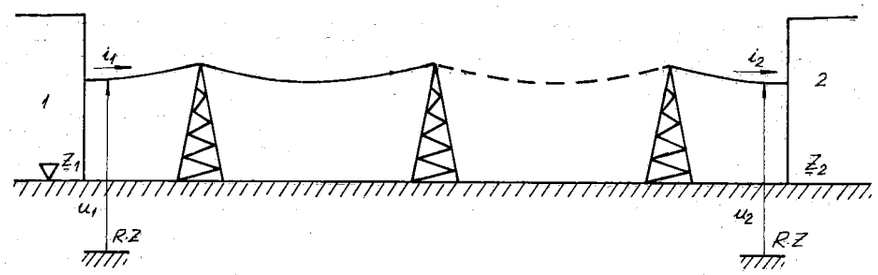
Sovjetski normativi dozvoljavaju slične vrednosti napona dodira kao i američki, a ne predviđaju proračune napona koraka [87].

6.3. VAZDUŠNI VOD KAO ELEMENT SISTEMA UZEMLJENJA

Vazdušni vodovi moraju se razmatrati u sklopu sistema uzemljenja distributivnih mreža da bi se procenili uticaji zaštitnih provodnika kao dopunskih uzemljivača postrojenja, a takođe i kao prenosnika potencijala na stubove duž trase i susedna postrojenja.

6.3.1. NAPONI I STRUJE NA ZAŠTITNOM PROVODNIKU

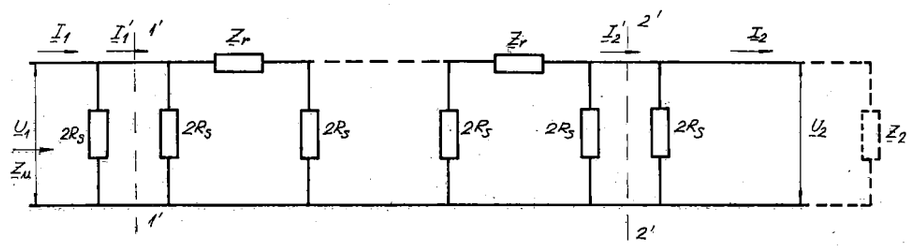
Posmatrajmo vazdušni vod koji povezuje dva postrojenja, 1 i 2. Pretpostavlja se da vod ima zaštitni provodnik na celoj dužini (sl. 6.8).



Sl. 6.8

Ako u postrojenju 1 dođe do zemljospoja, na uzemljivaču pomenutog postrojenja pojaviće se u odnosu na referentnu zemlju potencijal $\underline{U}_1$ usled koga će po zaštitnom provodniku prema postrojenju 2 poteći struja $\underline{I}_1$. Odnos napona $\underline{U}_1$ i struje $\underline{I}_1$ predstavlja »impedansu uzemljenja« vazdušnog voda $\underline{Z}_u$ preko koje se obuhvata njegov doprinos u odvođenju struje kvara.

U postrojenje 2 priticaće struja $\underline{I}_2$ koja će na impedansi uzemljenja postrojenja $\underline{Z}_2$ prouzrokovati napon $\underline{U}_2$ (Sl. 6.8).



Sl. 6.9

Uzajamna veza između pomenutih veličina može se analizirati preko električne šeme prikazane na sl. 6.9. U šemi je sa R_s označena otpornost uzemljenja stubova a sa Z_r impedansa zaštitnog provodnika na jednom rasponu. Ekvivalentna šema ne obuhvata eksplicitno aktivnu otpornost na koju nailazi struja u tlu između uzemljivača stubova, koja je zanemarljivo mala prema otporima R_s. Uticaj pomenute otpornosti može se obuhvatiti, približno, povećanjem aktivne otpornosti u impedansi $\underline{Z}_r$ ili, još bolje, povećanjem R_s.

Impedansa $\underline{Z}_r$ jednaka je

$$\underline{Z}_r = \underline{z}_r l_1 \tag{6.18}$$

gde je sa l_1 označena dužina raspona, a sa $\underline{z}_r$ podužna impedansa zaštitnog provodnika za konturu koju ovaj obrazuje sa tlom. Na osnovu razmatranja u 5.6 može se pisati

$$\underline{z}_r = r + j\,x, \tag{6.19}$$

sa

$$r = \rho_u \frac{10^3}{q_u}\ \Omega/\mathrm{km} \tag{6.20}$$

$$x = 0{,}1445 \log \frac{D_e}{r_u} + 0{,}016\,\mu_r \quad \Omega/\mathrm{km}. \tag{6.21}$$

U (6.20) i (6.21) su:

- ρ_u — specifična električna otpornost provodnog dela zaštitnog užeta u $\Omega\,\mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$,
- q_u — površina vodljivog dela preseka užeta u mm^2,
- r_u — spoljni poluprečnik užeta u m,
- μ_r — relativni permeabilitet vodljivog dela užeta (u praktičnim proračunima se za bakar i aluminijum može uzeti $\mu_r \approx 1$ a za gvožđe $\mu_r \approx 30$ [8]).

Kako se vidi iz sl. 6.9, deo šeme između krajeva 1′ i 2′ predstavlja lanac na red vezanih simetričnih Π četvoropola sa parametrima $2R_s$, $\underline{Z}_r$, $2R_s$. Ako se sa n označi ukupan broj raspona voda, između veličina na krajevima 1′ i 2′ postoji poznata veza (na primer, [65]).

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_r \operatorname{ch} n\underline{g} + \underline{I}_2' \underline{Z} \operatorname{sh} n\underline{g} \\ \underline{I}_1' &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}} \operatorname{sh} n\underline{g} + \underline{I}_2' \operatorname{sh} n\underline{g}. \end{aligned} \tag{6.22}$$

Parametar $\underline{g}$ izračunava se prema relaciji [65]

$$\underline{g} = \ln\left[\underline{A}_{11} + \sqrt{\underline{A}_{11}^2 - 1}\right] \tag{6.23}$$

a impedansa $\underline{Z}$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{A}_{12}}{\sqrt{\underline{A}_{11}^2 - 1}}. \tag{6.24}$$

U (6.23) i (6.24) $\underline{A}_{11}$ i $\underline{A}_{12}$ predstavljaju odgovarajuće konstante četvoropola $2R_s$, $\underline{Z}_r$, $2R_s$

$$\underline{A}_{11} = 1 + \frac{\underline{Z}_r}{2R_s} \tag{6.25}$$

$$\underline{A}_{12} = \underline{Z}_r \tag{6.26}$$

Kada se (6.25) i (6.26) uvrsti u (6.23) i (6.24), dobija se

$$\underline{g}=\ln\left[1+\frac{\underline{Z}_r}{2R_s}+\sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_s}+\left(\frac{\underline{Z}_r}{2R_s}\right)^2}\right] \tag{6.27}$$

i

$$\underline{Z}=\sqrt{\frac{\underline{Z}_r\cdot 2R_s}{2+\frac{\underline{Z}_r}{2R_s}}}. \tag{6.28}$$

U praktičnim uslovima je obično

$$\frac{\underline{Z}_r}{2R_s}\ll 1 \tag{6.29}$$

tako da se može koristiti aproksimacija

$$ln\,(1+\underline{y})\approx\underline{y}$$

na osnovu koje se iz (6.27) dobija

$$\underline{g}\approx\frac{\underline{Z}_r}{2R_s}+\sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_s}+\left(\frac{\underline{Z}_r}{2R_s}\right)^2}\approx\frac{\underline{Z}_r}{2R_s}+\sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_s}}. \tag{6.30}$$

S obzirom na (6.29), formula (6.28) može se zameniti približnom

$$\underline{Z}\approx\sqrt{\underline{Z}_r R_s}. \tag{6.31}$$

Izvedene relacije omogućavaju izračunavanje impedanse $\underline{Z}_u$, merodavne za procenu uticaja zaštitnog provodnika kao dopunskog uzemljivača postrojenja 1.

Iz šeme na sl. 6.9 sledi

$$\underline{Z}_u=\frac{2R_s\underline{Z}_u'}{2R_s+\underline{Z}_u'}, \tag{6.32}$$

gde je sa $\underline{Z}_u'$ označena impedansa određena na krajevima 1′

$$\underline{Z}_u'=\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1'}. \tag{6.33}$$

Ako se u jednačine (6.22) uvrsti (Sl. 6.9)

$$\underline{U}_2=\underline{I}_2'\underline{Z}_2' \tag{6.34}$$

sa

$$\underline{Z}_2'=\frac{2R_s\underline{Z}_2}{2R_s+\underline{Z}_2} \tag{6.35}$$

iz ovih se jednačina dobija, prema (6.33),

$$\underline{Z}_u'=\underline{Z}\frac{\operatorname{ch}\underline{ng}+\frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2'}\operatorname{sh}\underline{ng}}{\operatorname{sh}\underline{ng}+\frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2'}\operatorname{ch}\underline{ng}}. \tag{6.36}$$

Pored impedanse $\underline{Z}_u$, za praktična razmatranja od značaja je i vrednost potencijala $\underline{U}_2$, prenesenog u postrojenje 2.

Preneseni ili »izlazeći« potencijal, kako se ovaj obično naziva, procenićemo preko faktora

$$k_i=\frac{U_2}{U_1}. \tag{6.37}$$

Ako se u prvoj od jednačina (6.22) zameni $\underline{U}_2$ prema (6.34), za razmatrani faktor se dobija

$$k_i=\frac{1}{\left|\operatorname{ch}\underline{ng}+\frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2'}\operatorname{sh}\underline{ng}\right|} \tag{6.38}$$

6.3.2. PRIBLIŽNI IZRAZI ZA $\underline{Z}_u$ I $\underline{k}_i$

Formule (6.36) i (6.38) su dosta složene. One se, međutim, mogu znatno uprostiti u većini praktičnih slučajeva.

Dugi vodovi

Izvedeni izrazi za analizirane karakteristične veličine mogu se pojednostaviti kod vodova sa velikim brojem raspona.

Ako označimo

$$\underline{g}=a+jb, \tag{6.39}$$

može se pisati

$$\operatorname{ch}\underline{ng}=\frac{1}{2}e^{jbn}e^{an}+\frac{1}{2}e^{-jbn}e^{-an}$$
$$\operatorname{sh}\underline{ng}=\frac{1}{2}e^{jbn}e^{an}-\frac{1}{2}e^{-jbn}e^{-an}. \tag{6.40}$$

Kako se vidi iz (6.40), pri dovoljno velikom n drugi članovi u izrazima postaće po apsolutnoj vrednosti zanemarljivo mali prema prvim, tako da će biti

$$\operatorname{sh}\underline{ng}\approx\operatorname{ch}\underline{ng}\approx\frac{1}{2}\cdot e^{jbn}\cdot e^{an}. \tag{6.41}$$

Granično $n=n_d$ počev od koga praktično važi (6.41) može se odrediti iz uslova

$$e^{-an_d}\leqslant\varepsilon\, e^{an_d}, \tag{6.42}$$

gde je sa $\varepsilon\ll 1$ označen mali broj čija se vrednost usvaja prema stepenu tačnosti koja se zahteva od formule (6.41).

Prema (6.42) n_d je jednako najmanjem celom broju koji zadovoljava relaciju

$$n_d \geqslant \frac{1}{a} \ln \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}. \tag{6.43}$$

Za, na primer, $\varepsilon=0{,}05$, iz (6.43) se dobija

$$n_d \geqslant \frac{1{,}498}{a} \approx \frac{1{,}5}{a}. \tag{6.44}$$

Pošto n_d obično nije veće od reda $5 \div 10$, u najvećem broju praktičnih slučajeva biće $n > n_d$ tako da će se moći primeniti uprošćenje (6.41). Vodovi koji ispunjavaju navedene uslove mogu se smatrati »dugim« u proračunima uzemljenja.

S obzirom na (6.41) i (6.36) za duge vodove je

$$\underline{Z}_u' \approx \underline{Z}. \tag{6.45}$$

Ako se $\underline{Z}_u'$ prema (6.45) uvrsti u (6.32) dobija se, kada se ima u vidu (6.28),

$$\underline{Z}_u = \frac{R_s}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{R_s}{\underline{Z}_r} + \frac{1}{4}}}. \tag{6.46}$$

S obzirom na (6.29), drugi član pod korenom u (6.46) može se zanemariti u odnosu na prvi tako da se ima

$$\underline{Z}_u \approx \frac{\sqrt{\underline{Z}_r R_s}}{1 + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_s}}} \approx \sqrt{\underline{Z}_r R_s}\left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_s}}\right) = \sqrt{\underline{Z}_r R_s} - \frac{\underline{Z}_r}{2}. \tag{6.47}$$

Koeficijent k_i kod dugih vodova jednak je, prema (6.38) i (6.41)

$$k_i = \frac{2\, e^{-an}}{\left| 1 + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2'} \right|}. \tag{6.48}$$

Izrazi (6.46) do (6.48) dovoljno su jednostavni za praktičnu primenu.

Kratki vodovi

Formule za parametre $\underline{Z}_u$ i k_i uprošćavaju se i u slučaju kada je vazdušni vod kratak tako da se hiperbolične funkcije mogu zameniti prvim članovima ekvivalentnih potencijalnih redova.

Može se smatrati da se funkcije

$$\operatorname{sh} \underline{ng} = ng + \frac{(ng)^3}{3!} + \frac{(ng)^5}{5!} + \dots$$

$$\operatorname{ch} \underline{ng} = 1 + \frac{(ng)^2}{2!} + \frac{(ng)^4}{4!} + \dots$$

zadovoljavajuće tačno izračunavaju preko približnih izraza

$$\operatorname{sh} \underline{ng} \approx \underline{ng}$$

$$\operatorname{ch} \underline{ng} \approx 1, \tag{6.49}$$

ako je

$$\frac{(ng)^2}{2!} \leqslant \varepsilon, \tag{6.50}$$

gde smo sa ε označili usvojeni mali broj. Vodovi koji ispunjavaju uslov (6.50) mogu se smatrati kratkim kod proračuna uzemljenja.

Saglasno (6.50) kratki vodovi su oni kod kojih broj raspona nije veći od graničnog, određenog relacijom

$$n_k \leqslant \frac{1}{g}\sqrt{2\varepsilon}. \tag{6.51}$$

Za $\varepsilon=0{,}05$ uslov (6.51) postaje

$$n_k \leqslant \frac{0{,}316}{g}. \tag{6.52}$$

Sačinilac k_i kod kratkih vodova jednak je približno, saglasno (6.38) i (6.49),

$$k_i = \frac{1}{\left| 1 + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2'} \underline{ng} \right|}. \tag{6.53}$$

Prema (6.30) i (6.31) ima se, približno,

$$\underline{Z}\, \underline{ng} \approx n \underline{Z}_r \left(1 + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_s}}\right) \approx n \underline{Z}_r. \tag{6.54}$$

S obzirom na (6.54) ,iz (6.53) se dobija

$$k_i = \frac{1}{\left| 1 + \frac{n \underline{Z}_r}{\underline{Z}_2'} \right|}. \tag{6.55}$$

Kako se vidi iz šeme na sl. 6.9, formula (6.55) odgovara zanemarenju uticaja otpornosti uzemljenja stubova.

Kada se u (6.36) uvrsti sh ng i ch ng prema (6.49), za impedansu $\underline{Z}'_u$ se dobija

$$\underline{Z}_u' = \frac{1 + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2'} \underline{ng}}{\frac{\underline{ng}}{\underline{Z}} + \frac{1}{\underline{Z}_2'}}. \tag{6.56}$$

Na osnovu (6.30) i (6.31) ima se, posle sređivanja,

$$\frac{\underline{ng}}{\underline{Z}} = \frac{n}{R_s}\left(1 + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_s}}\right) \approx \frac{n}{R_s}. \tag{6.57}$$

Tako se, na osnovu (6.54) i (6.57), dolazi do približne formule

$$\underline{Z}_u' = \frac{\underline{Z}_2' + n\underline{Z}_r}{1 + \frac{\underline{Z}_2'}{R_s} n} . \tag{6.58}$$

Neka, primera radi, jedan vazdušni vod ima zaštitni provodnik od čeličnog užeta 35 mm², $2r_u = 7$ mm, i dužinu raspona $l_1 = 200$ m. Otpornost rasprostiranja uzemljivača stuba je $R_s = 10\ \Omega$, a srednja specifična otpornost tla $\rho = 100\ \Omega$m.

Prema (6.20) je

$$r = 0{,}15 \frac{10^3}{35} = 4{,}29\ \Omega/\text{km}.$$

Na osnovu (5.103) ekvivalentna dubina povratnog puta struja iznosi

$$D_e = 658 \cdot \sqrt{\frac{100}{50}} = 930\ \text{m}.$$

Tako je prema (6.21)

$$x = 0{,}1445 \log \frac{2 \cdot 930}{0{,}007} + 0{,}016 \cdot 30 = 1{,}25\ \Omega/\text{km}.$$

Impedansa $\underline{Z}_r$ je, saglasno (6.19),

$$\underline{Z}_r = (4{,}29 + j\,1{,}25) \cdot 0{,}2 = 0{,}856 + j\,0{,}25 =$$

$$= 0{,}89 \cdot e^{j\,16{,}4^\circ}\ \Omega/\text{ras}.$$

Pošto je

$$\frac{Z_r}{2R_s} = \frac{0{,}89}{2 \cdot 10} = 0{,}0445 \ll 1,$$

konstanta $\underline{g}$ se može izračunati prema (6.30)

$$\underline{g} = \frac{0{,}856 + j\,0{,}25}{2 \cdot 10} + \sqrt{\frac{0{,}89}{20}} \cdot e^{j\frac{16{,}4^\circ}{2}}$$

$$= 0{,}251 + j\,0{,}043 = 0{,}252 \cdot e^{j\,9{,}8^\circ}.$$

Prema (6.31) je

$$\underline{Z} = \sqrt{10 \cdot 0{,}89} \cdot e^{j\,8{,}2^\circ} = 2{,}98 + j\,0{,}43\ \Omega.$$

Vod se može smatrati dugim ako je

$$n \geqslant n_d = \frac{1{,}5}{0{,}251} \approx 6.$$

Ako je vod duži od 6 raspona odnosno 1200 m, on se može smatrati beskonačno dugim pri proračunima impedanse uzemljenja.

Ova je impedansa onda, saglasno (6.47),

$$\underline{Z}_u = \sqrt{2{,}98 + j\,0{,}43} - \frac{0{,}856 + j\,0{,}25}{2} =$$

$$= 3{,}41 + j\,0{,}55 = 3{,}42 \cdot e^{j\,9{,}3^\circ}\ \Omega.$$

Broj raspona n_k do kog se vod može smatrati kratkim je prema (6.52)

$$n_k = \frac{0{,}316}{0{,}252} = 1{,}25 \approx 1.$$

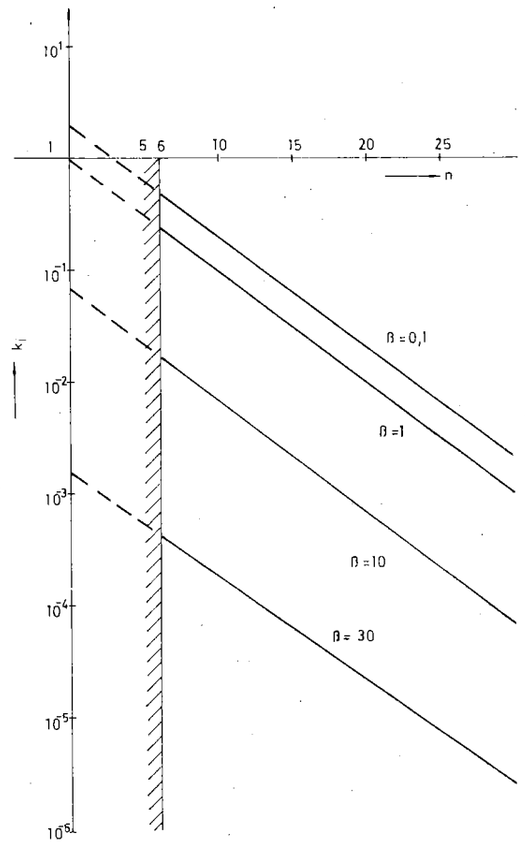
Faktor k_i za $n \geqslant n_d$ je prema (6.48)

$$k_i = \frac{2 \cdot e^{-0{,}251\,n}}{|1 + \underline{\beta}|}$$

gde smo označili

$$\underline{\beta} = \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2'} .$$

Faktor k_i izračunat je kao funkcija broja raspona n i prikazan grafički na sl. 6.10. Pošto impedanse $\underline{Z}$ i $\underline{Z}_2'$ imaju približno rezistantni karakter, parametar β je praktično realan broj.



Sl. 6.10

Minimalna vrednost $\beta = 0{,}1$ ima se za slučaj vrlo velikog otpora uzemljenja postrojenja na kraju voda, a maksimalna, $\beta = 30$, kod otpora uzemljenja pomenutog postrojenja ispod reda 0,1 Ω. Dijagramima je tako obuhvaćen ceo dijapazon mogućih vrednosti β.

Kako se iz sl. 6.10 vidi, vrednosti $k_i \leqslant 0{,}1$ postižu se u svim slučajevima već posle 10 do 15 raspona odnosno 1500 do 2500 m dužine voda.

6.4. KABLOVI U SISTEMU UZEMLJENJA

Kablovi u znatnoj meri utiču na karakteristike sistema uzemljenja distributivnih mreža kao spone između uzemljivača susednih postrojenja i kao uzemljivači, ako su sa neizolovanim metalnim plaštom. Da bi se pomenuti uticaji mogli proceniti, u narednim odeljcima biće izvedena orijentaciona teorijska analiza karakterističnih svojstava pojedinih kablova u različitim uslovima.

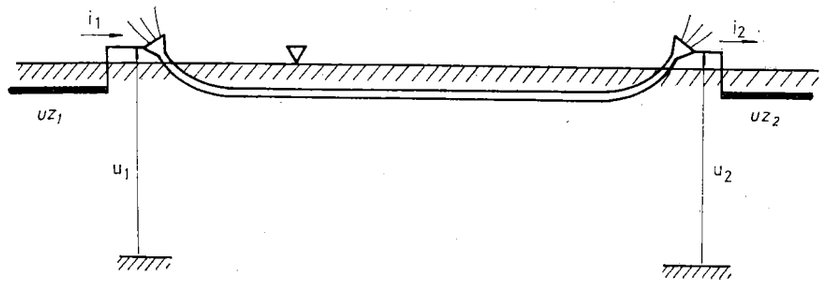
6.4.1. KABLOVI SA PROVODNIM SPOLJNIM OMOTAČEM

Kako su mnoga merenja na uzemljenjima postrojenja pokazala, kablovi koji imaju metalni plašt i armaturu sa antikorozionom zaštitom od asfaltirane jute, tekstila, papira i sl., 2 do 6 meseci posle polaganja dolaze do dobrog kontakta sa okolnim tlom usled ovlaživanja.

Kablovi IPO 13 i IPZO 13 sa izolacijom od impregnisanog papira i olovnim plaštevima, koji se u Jugoslaviji široko primenjuju u mrežama 10 do 35 kV, pripadaju razmatranoj vrsti.

Struje i naponi na plaštu

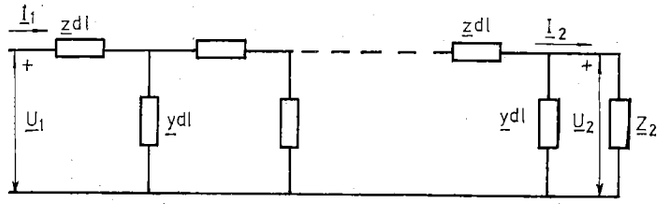
Posmatrajmo kabl sa metalnim plaštom i provodnim spoljnim omotačem, koji je položen prema sl. 6.11.



Sl. 6.11

UZ_1 i UZ_2 su zaštitna uzemljenja postrojenja između kojih je položen kabl (naprimer, TS 35/10 kV/kV i TS 10/0,4 kV/kV), a »u« i »i« su naponi i struje plašta kabla na njegovim krajevima. Smer struja usvojen je uz pretpostavku da je do povišenja potencijala usled kvara došlo na uzemljivaču 1. Sa $\underline{Z}_2$ označen je otpor rasprostiranja uzemljivača postrojenja 2.

Na sl. 6.12 prikazana je ekvivalentna električna šema za proračun struja i napona na plaštu kabla u razmatranom slučaju. Zanemarena je otpornost tla R_z pošto je znatno manja od ostalih impedansi u šemi.



Sl. 6.12

Sa $\underline{z}$ je označena podužna impedansa plašta kabla koju ovaj suprotstavlja proticanju struja, a sa $\underline{y}$ otočna admitansa preko koje se struja odvodi u okolno tlo. Oba parametra odnose se na jedinicu dužine kabla. Sa dl je označen elemenat dužine kabla.

Na osnovu razmatranja u 5.6.3 može se pisati

$$\underline{z}=r+j\,x, \tag{6.59}$$

gde je

$$r=R_{pa}+r_a \tag{6.60}$$

$$x=X_k+x_a, \tag{6.61}$$

sa istim značenjem parametara kao u tački 5.6.3.

Admitansa $\underline{y}$ ima praktično čisto konduktivni karakter i u prvoj približnosti može se smatrati jednakom odvodnosti horizontalno položenog uzemljivača [8]

$$\underline{y}\approx g=\frac{\pi}{\rho}\,\frac{10^3}{\ln\dfrac{l}{\sqrt{HD}}}\,S/\mathrm{km}. \tag{6.62}$$

Ovde je H dubina ukopavanja kabla, D spoljni prečnik provodnog plašta, a l ukupna dužina kabla između objekata 1 i 2 (sl. 6.11).

Na šemu sa sl. 6.12 mogu se primeniti opšte jednačine za vodove sa raspodeljenim parametrima. Tako se dolazi do sledeće veze između napona i struja na krajevima plašta

$$\begin{aligned}\underline{U}_1&=\underline{U}_2\,\mathrm{ch}\,\underline{\gamma}\,l+\underline{I}_2\underline{Z}\,\mathrm{sh}\,\underline{\gamma}\,l\\ \underline{I}_1&=\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}}\,\mathrm{sh}\,\underline{\gamma}\,l+\underline{I}_2\,\mathrm{ch}\,\underline{\gamma}\,l,\end{aligned} \tag{6.63}$$

gde je konstanta prostiranja

$$\underline{\gamma}=\sqrt{\underline{z}\underline{y}}, \tag{6.64}$$

a karakteristična impedansa

$$\underline{Z}=\sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}}. \tag{6.65}$$

Jednačine (6.63) imaju isti opšti oblik kao i jednačine (6.22), osim što u njima, umesto ng, kao argument hiperboličkih funkcija figurira parametar $\underline{\gamma}\,l$. Navedenu analogiju koristićemo za jednostavno izvođenje izraza za pojedine karakteristične veličine kabla.

Izlazeći potencijal i impedansa uzemljenja

Analogno (6.38), koeficijent izlazećeg potencijala preko plašta kabla može se izračunati prema izrazu

$$k_i=\frac{U_2}{U_1}=\frac{1}{\left|\mathrm{ch}\,\underline{\gamma}\,l+\dfrac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\,\mathrm{sh}\,\underline{\gamma}\,l\right|}. \tag{6.66}$$

Impedansa uzemljenja kabla merena na kraju u postrojenju 1 jednaka je, saglasno (6.36),

$$\underline{Z}_u=\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}=\underline{Z}\,\frac{\operatorname{ch}\underline{\gamma}\,l+\dfrac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\operatorname{sh}\underline{\gamma}\,l}{\operatorname{sh}\underline{\gamma}\,l+\dfrac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\operatorname{ch}\underline{\gamma}\,l}. \tag{6.67}$$

Formule (6.66) i (6.67) mogu se uprostiti kod dugih i kratkih kablova, slično kao kod vazdušnog voda.

Po kriterijumu analognom (6.42), granična dužina kabla počev od koje se može smatrati dugim, određena je izrazom

$$al_d=\ln\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}, \tag{6.68}$$

gde sa »a« označen realni deo konstante »$\underline{\gamma}$«.

S obzirom na (6.62), (6.64) i (6.65) ima se

$$a=\sqrt{g}\cdot\alpha, \tag{6.69}$$

pri čemu je usvojena oznaka

$$\alpha=R_e\{\sqrt{\underline{z}}\}. \tag{6.70}$$

Zamenom »a« prema (6.69) u (6.68) dobija se posle sređivanja, kada se ima u vidu (6.62), sledeća jednačina za određivanje l_d

$$\frac{l_d^2}{\ln l_d+A}=B. \tag{6.71}$$

U (6.71) smo označili

$$A=\ln\frac{1}{\sqrt{HD}} \tag{6.72}$$

$$B=\frac{\rho}{\alpha^2}\frac{1}{\pi}\left(\ln\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\right)^2. \tag{6.73}$$

Za, na primer, $\varepsilon=0{,}05$ je

$$B=0{,}71\,\frac{\rho}{\alpha^2}. \tag{6.74}$$

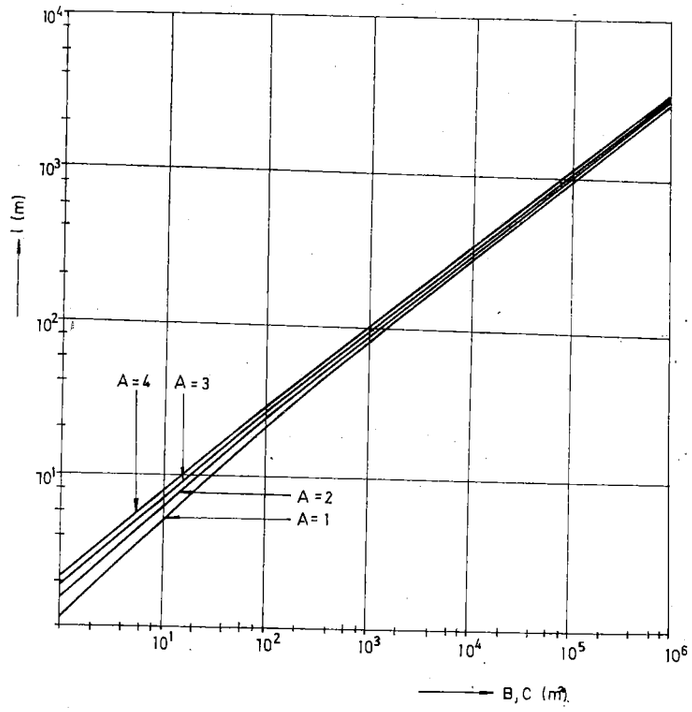
Kako je prema (6.70)

$$\alpha^2=\frac{1}{2}(z+r),$$

dobija se

$$B=1{,}42\,\frac{\rho}{z+r}. \tag{6.75}$$

Rešenja jednačine (6.71) nije moguće odrediti u konačnom analitičkom obliku. Ona su nađena numerički na digitalnom računaru u funkciji od B za nekoliko karakterističnih vrednosti veličine A kao parametra i prikazana u vidu dijagrama na sl. 6.13 [96].



Sl. 6.13

Iz toka krivih na sl. 6.13 i izraza (6.75) zaključuje se da visoke vrednosti specifčnog otpora tla povećavaju graničnu dužinu, a visoke vrednosti podužne impedanse i aktivnog otpora plašta kabla je smanjuju.

Kod dugih kablova je, analogno (6.48) i (6.45),

$$k_i\approx\frac{2\,e^{-al}}{\left|1+\dfrac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right|} \tag{6.76}$$

i

$$\underline{Z}_u\approx\underline{Z}. \tag{6.77}$$

Relacija (6.77) omogućava dobru orijentacionu analizu uticaja specifične otpornosti tla i podužne impedanse plašta kabla na impedansu uzemljenja.

Impedanse uzemljenja dva duga kabla jednakih podužnih impedansi, spoljnih prečnika i dubine ukopavanja, ako su ovi položeni u tlo sa različitim specifičnim otpornostima stajaće u odnosu

$$\frac{Z_{u1}}{Z_{u2}}=\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}. \tag{6.78}$$

Impedanse uzemljenja kablova različitih podužnih impedansi, položenih u tlo jednakih karakteristika, biće u odnosu

$$\frac{Z_{u1}}{Z_{u2}}=\sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}. \tag{6.79}$$

Iz (6.79) sledi zaključak da će otpornost uzemljenja određenog kabla biti niža pri odvođenju većih struja kvara, kada se usled zasićenja čelične armature smanjuje podužna induktivnost plašta.

Granična dužina kabla do koje se ovaj može smatrati kratkim u proračunima uzemljenja određuje se, analogno (6.50), iz uslova

$$\gamma^2 l_k^2=2\varepsilon. \tag{6.80}$$

S obzirom na (6.64), jednačina (6.80) može se napisati u obliku

$$\frac{l_k^2}{\ln l_k+A}=C, \tag{6.81}$$

gde smo označili

$$C=\frac{2\varepsilon}{\pi}\frac{\rho}{z}.$$

Za ε=0,05, koliko se može usvojiti u praktičnim procenama, dobija se

$$C=0{,}0318\frac{\rho}{z}. \tag{6.82}$$

S obzirom da je jednačina (6.81) istog oblika kao (6.71), dijagram na sl. 6.13 može poslužiti i za određivanje dužina l_k, ako se na apscisnu osu umesto konstante B nanese C.

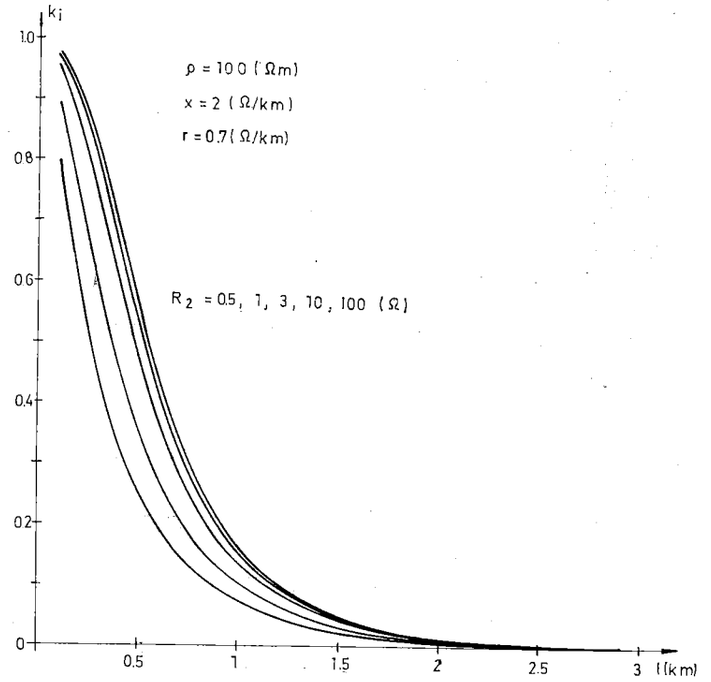
Kod kratkih kablova je, slično (6.53) i (6.58),

$$k_i\approx\frac{1}{\left|1+\frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\gamma l\right|}=\frac{1}{\left|1+\frac{\underline{z}\,l}{\underline{Z}_2}\right|}, \tag{6.83}$$

$$\underline{Z}_u\approx\frac{\underline{Z}_2+\underline{z}\,l}{1+\underline{Z}_2\,gl}. \tag{6.84}$$

Da bi se dobila kvantitativna slika o razmatranim efektima, na računaru je izveden niz proračuna faktora k_i i impedanse uzemljenja za kablove sa parametrima koji mogu da odgovaraju kablovima IPO 13, 10 kV.

Na sl. 6.14 prikazana je zavisnost faktora izlazećeg potencijala od dužine kabla između postrojenja, kod različitih vrednosti otpornosti uzemljenja postrojenja 2, koje su smatrane čisto aktivnim. Usvojena vrednost x=2 Ω/km odnosi se na slučaj kada se preko plašta odvode umerene struje, na primer do reda 400÷500 A, pri kojima ne dolazi do magnetnog zasićenja čelične armature kabla. Kako se vidi sa



Sl. 6.14

slike, pri R_2=0,5 Ω, što odgovara gradskim uslovima, izlazeći potencijal brzo opada sa dužinom kabla. Kod, na primer, $l\approx$500 m izlazeći potencijal nije veći od 25% napona na uzemljenju postrojenja u kome je došlo do zemljospoja.

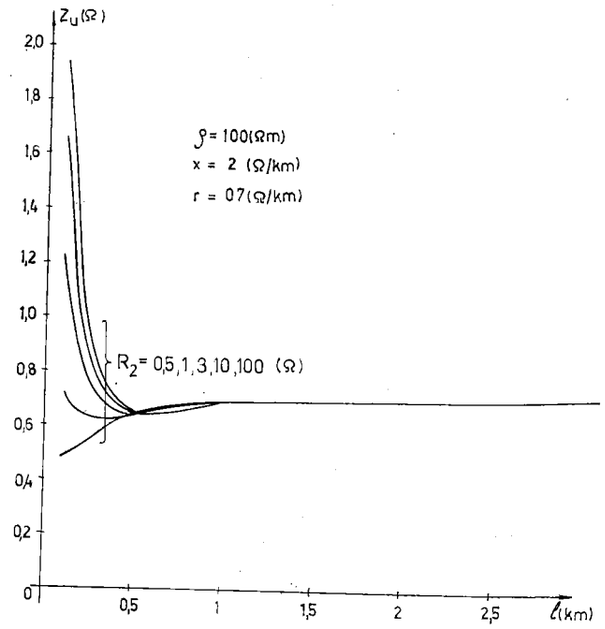
Na sl. 6.15 prikazana je zavisnost impedanse uzemljenja Z_u od dužine kabla za iste uslovè kao kod sl. 6.14.

Posle l=500 m impedansa Z_u se praktično ustaljuje na svojoj graničnoj vrednosti (6.77) za duge kablove.

U tabeli 6.2 date su vrednosti karakterističnih veličina kabla kao uzemljivača, pri različitim vrednostima specifične otpornosti tla, za parametre koji mogu da odgovaraju kablovima IPO 13, 10 kV. Tabela je sastavljena na osnovu dijagrama na sl. 6.13 i izraza (6.75), (6.81) i (6.77). Impedansa uzemljenja određena je za slučaj kada se kabl može smatrati dugim.

Tabela 6.2 pokazuje da se kod niskih ρ kablovi ponašaju kao dugi u proračunima uzemljenja već kod dužina reda 300÷500 m. Tada oni suprotstavljaju

oticanju struja vrlo niske impedanse uzemljenja, Z_u, nezavisno od vrednosti otpornosti uzemljenja postrojenja 2, što predstavlja značajno korisno svojstvo.



Sl. 6.15

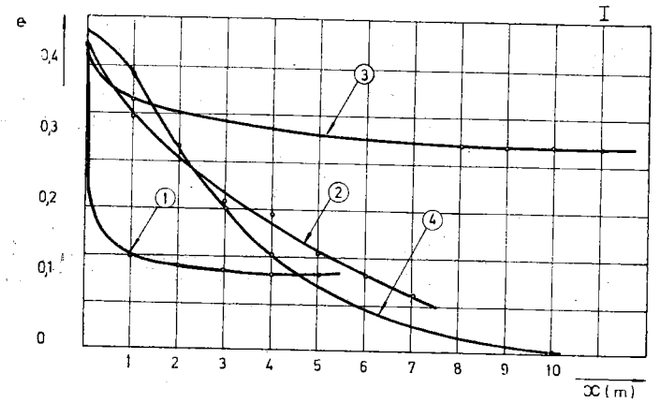
TABELA 6.2

r x Ω/km	ρ Ωm	B m²	l_d m	Z_u Ω	C m²	l_k m
0,7	30	15 100	300	0,35	45	13
2	100	50 400	600	0,63	1 500	90
	500	252 000	1 600	1,60	7 500	250
0,7	30	25 000	500	0,26	950	70
0,7	100	83 500	800	0,42	3 180	150
	500	417 500	2 000	1,10	15 900	400

U prosečnim uslovima odvođenja struja, kod $\rho = 100$ Ωm, kablovi se ponašaju kao kratki do dužina 90÷150 m, što pokazuje da se pri proračunima uticaja kablova kao uzemljivača na ovim dužinama kablovi mogu obuhvatiti kao obični horizontalni uzemljivači, bez uvažavanja podužnih padova napona.

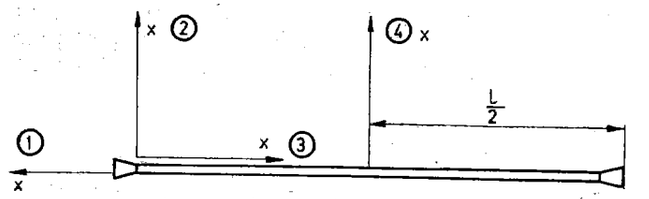
Eksperimentalni rezultati

Na sl. 6.16 prikazani su rezultati merenja raspodele potencijala nad izdvojeno položenim kablom 0,4 kV tipa PO 13, dužine 200 m, sa olovnim plaštom i mehaničkom zaštitom od čelične trake prekrivenom asfaltiranom jutom [97]. Kabl je položen u peskovito tlo na dubinu 0,6÷0,7 m, a pre merenja je u tlu ležao oko godinu dana.



Sl. 6.16

Plašt kabla doveden je na potencijal u odnosu na referentnu zemlju pomoću pomoćnog uzemljivača i pokretnog agregata 380 V, 50 Hz. Raspodela potencijala merena je duž više karakterističnih pravaca, kako je pokazano na sl. 6.17. Strelice označavaju smer porasta koordinate X za pojedine pravce. Potencijali na sl. 6.16 prikazani su relativno, u odnosu na potencijal plašta kabla.



Sl. 6.17

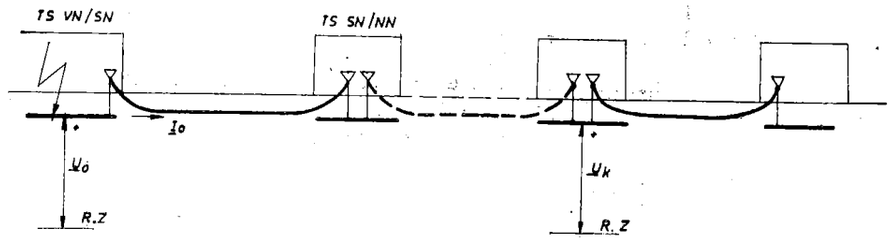
Krive na sl. 6.16 imaju tok tipičan za horizontalni uzemljivač kružnog ili pravougaonog preseka, odgovarajućih dimenzija i dubine ukopavanja. Raspodela na pravcu 3 kod horizontalnog uzemljivača karakteriše se blagim monotonim porastom potencijala od kraja uzemljivača do njegove sredine, na kojoj potencijal ima maksimalnu vrednost. Merenjem utvrđeno povišenje potencijala kod kraja kabla posledica je smanjivanja dubine ukopavanja zbog ulaska u provizorni drveni razvodni orman koji je bio izveden bez sopstvenog uzemljivača.

Otpornost uzemljenja kabla nije mogla da bude izmerena izdvojeno pošto je ovaj bio pod zemljom u kontaktu sa temeljnim uzemljivačem zgrade u blizini.

Raspodela relativnog potencijala na pravcu 4 poklapa se praktično, sa odstupanjima manjim od 30%, sa raspodelom koja bi se imala nad horizontalnim uzemljivačem iste dužine i spoljnjeg prečnika. Kabl se, može se zaključiti, ponaša približno kao horizontalni uzemljivač sa koncentrisanim parametrima, što je karakteristično za kratke kablove prema ranijim razmatranjima. Budući da je specifična otpornost tla na trasi iznosila između 500 i 1000 Ωm, kabl je stvarno imao karakteristike kratkog kabla (Tabela 6.2).

6.4.2. KABLOVI SA IZOLOVANIM METALNIM PLAŠTOM

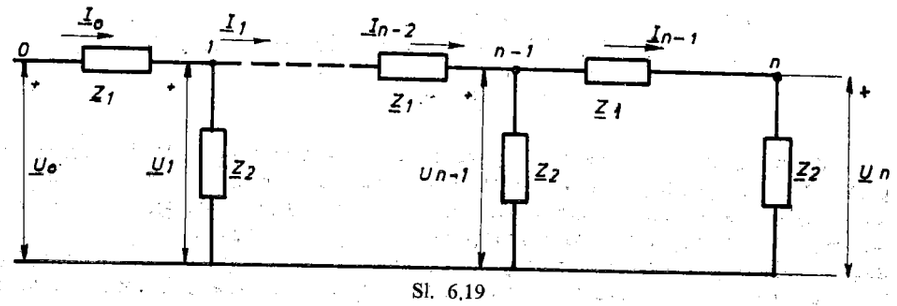
Kablovi sa izolovanim metalnim plaštom ne deluju neposredno kao uzemljivači već posredno, povezujući međusobno uzemljivače objekata između kojih su položeni.



Sl. 6.18

Na sl. 6.18 prikazan je kablovski vod sa izolovanim metalnim plaštom koji polazi iz TS-visoki/srednji ili srednji/srednji napon i napaja nekoliko TS-srednji/niski napon.

U slučaju zemljospoja u izvornoj TS, na uzemljenju ovog postrojenja pojaviće se napon $\underline{U}_0$ prema referentnoj zemlji i preko plašta razmatranog kabla poteći će struja $\underline{I}_0$ ka uzemljenjima TS-srednji/niski napon. Na ovim će se uzemljenjima pojaviti naponi prema referentnoj zemlji — izlazeći potencijal, koji će imati najviše vrednosti kod TS najbliže izvornom postrojenju, a zatim postepeno opadati duž kablovskog voda, zavisno od dužina deonica voda između TS i njihove otpornosti uzemljenja.



Sl. 6.19

Ekvivalentna električna šema za proračun pomenutih veličina prikazana je na sl. 6.19.

Redni elementi u šemi predstavljaju impedansu plašta kabla na deonicama između susednih TS srednji/niski napon. Pomenuta impedansa može se odrediti kao

$$\underline{Z}_1 = \underline{z}l = (r + j\,x)\,l, \tag{6.85}$$

gde je sa l označena prosečna dužina kabla između dve TS, a sa $\underline{z}$ podužna impedansa plašta, saglasno (6.59). Kablovi razmatranog tipa obično nemaju čeličnu armaturu, tako da se izrazi (6.60) i (6.61) uprošćavaju.

Sa $\underline{Z}_2$ označena je impedansa uzemljenja TS-srednji/niski napon.

Šema na sl. 6.19 sastavljena je, kako se vidi, iz n »⅂« četvoropola sa parametrima $\underline{Z}_1$ i $\underline{Z}_2$, ako se sa n označi broj TS-srednji/niski napon duž kabla. Veličine na početku i kraju kabla, obeležimo ih indeksima »o« i »n«, respektivno, povezane su saglasno (6.22) relacijama

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 &= \underline{U}_n \operatorname{ch} n\underline{g} + \underline{I}_n \underline{Z} \operatorname{sh} n\underline{g} \\ \underline{I}_0 &= \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}} \operatorname{sh} n\underline{g} + \underline{I}_n \operatorname{ch} n\underline{g}. \end{aligned} \tag{6.86}$$

Za komponentne četvoropole $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ je, pri tom,

$$\begin{aligned} \underline{A}_{11} &= 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} \\ \underline{A}_{12} &= \underline{Z}_1 \end{aligned} \tag{6.87}$$

tako da se, s obzirom na (6.23) i (6.24) dobija

$$\underline{g} = \ln\left[1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \sqrt{2\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \left(\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2}\right)^2}\right] \tag{6.88}$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1}{\sqrt{2\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \left(\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2}\right)^2}} = \frac{\underline{Z}_2}{\sqrt{2\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} + 1}}. \tag{6.89}$$

Jednačine (6.86) mogu se uprostiti, pošto je u razmatranom slučaju (sl. 6.19),

$$\underline{I}_n = 0. \tag{6.90}$$

Impedansa uzemljenja kojom se obuhvata uticaj kabla kod proračuna uzemljenja napojnog postrojenja jednaka je, s obzirom na (6.86) i (6.90),

$$\underline{Z}_u = \frac{\underline{U}_0}{\underline{I}_0} = \underline{Z} \operatorname{cth} n\underline{g}. \tag{6.91}$$

Napon na uzemljenju k-te TS-srednji/niski napon, računato od napojnog kraja kabla, može se odrediti primenom prve od jednačina (6.86) na pomenutu TS. Tako se, kada se ima u vidu (6.90), dobija

$$\underline{U}_k = \underline{U}_n \operatorname{ch} (n - k)\,\underline{g}. \tag{6.92}$$

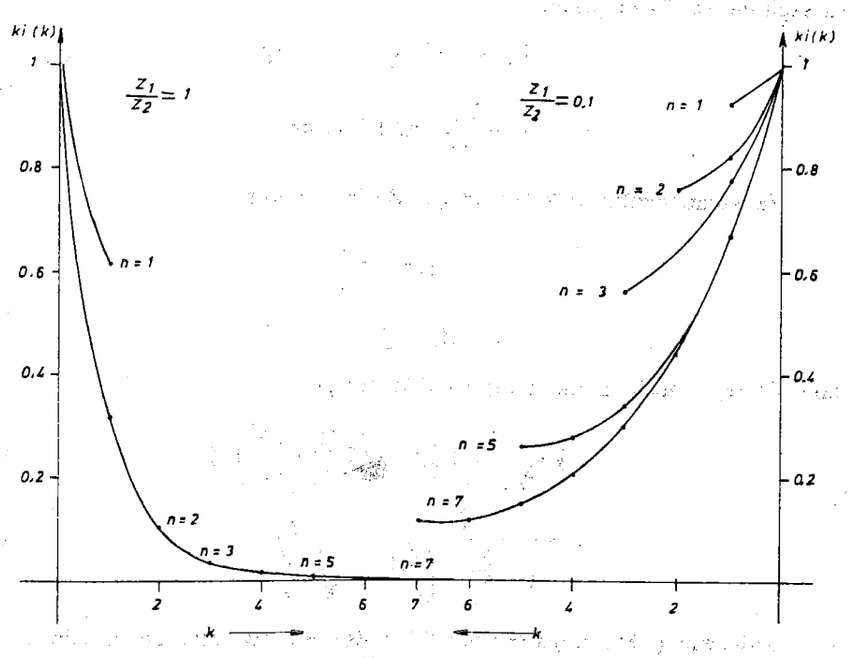
Koeficijent izlažećeg potencijala za posmatranu TS jednak je, prema definiciji,

$$k_{i\,(k)} = \frac{U_k}{U_0},$$

ili, s obzirom na (6.86), (6.90) i (6.92),

$$k_{i\,(k)} = \frac{|\operatorname{ch}(n-k)\,\underline{g}\,|}{|\operatorname{ch} n\underline{g}\,|}. \tag{6.93}$$

Predstava o redu vrednosti razmatranih parametara u praktičnim uslovima, može se dobiti iz dijagrama na sl. 6.20 i sl. 6.21.

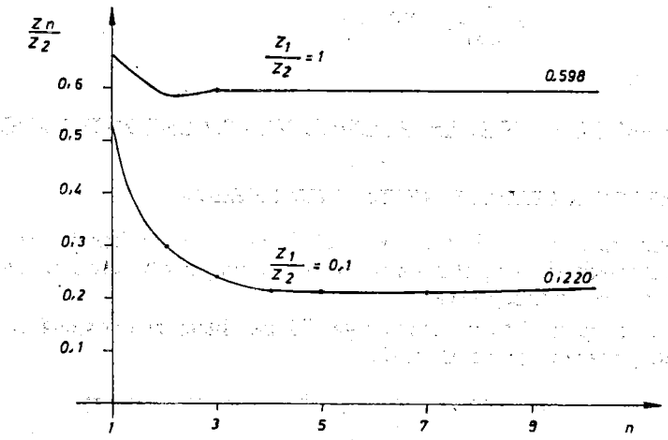


Sl. 6.20

Na sl. 6.20 prikazana je zavisnost odnosa impedanse uzemljenja kabla prema impedansi uzemljenja TS-srednji/niski napon od broja n ovih TS. Na sl. 6.21 pokazane su vrednosti koeficijenta izlazećeg potencijala kod pojedinih TS-srednji/niski napon za različito n. Proračuni su izvedeni uz pretpostavku da je $\underline{Z}_2$ čisto aktivna otpornost, a da $\underline{Z}_1$ ima jednak realni i imaginarni deo, što približno odgovara stvarnim uslovima.

Odnos $\frac{Z_1}{Z_2} = 0{,}1$ može se smatrati karakterističnim za mreže van naseljenih mesta sa pretežno vazdušnom mrežom niskog napona, a $\frac{Z_1}{Z_2} = 1$, za gradske i industrijske mreže kojima su svojstvene niske vrednosti Z_2.

Kako se vidi sa sl. 6.20, za $\frac{Z_1}{Z_2} = 0{,}1$ koeficijenti $k_{i\,(k)}$ u izvesnoj meri zavise od broja TS na vodu. Primera radi, koeficijent k_i na prvoj TS, ako se samo ova napaja vodom, iznosi 0,92, a kada se na vodu nalazi pet TS, samo 0,67, što znači da je izlazeći potencijal u drugom slučaju oko 40% manji. Pomenuti uticaj izraženiji je kod druge i treće TS.



Sl. 6.21

Kod $\frac{Z_1}{Z_2} = 1$ izlazeći potencijal opada mnogo brže nego u prethodno razmatranom slučaju. Pri tom se za $n \geqslant 2$ krive za $k_{i\,(k)}$ praktično poklapaju, što pokazuje da ukupan broj TS malo utiče na raspodelu potencijala duž voda. Osetno nepovoljnija situacija ima se, kako se vidi, kada vod napaja samo jednu TS. Koeficijent k_i za pomenutu TS je tada oko dva puta veći no u slučaju kada se na vodu ima još edna ili više TS.

Krive na sl. 6.21 pokazuju da odnos $\frac{\underline{Z}_u}{Z_2}$ dostiže svoje granične vrednosti, koje odgovaraju $n \to \infty$, već kada se imaju dve ili tri TS na vodu. Ovo dozvoljava da se u praktičnim proračunima impedansa uzemljenja kabla odredi kao

$$\underline{Z}_u \approx \underline{Z} \cdot \lim_{n\to\infty} |\operatorname{cth} n\underline{g}\,| = \underline{Z}, \tag{6.94}$$

saglasno (6.91).

Za kabl sa polietilenskom izolacijom i bakarnim plaštom preseka 25 mm² spoljnog prečnika 31 mm, pri $\rho = 60\ \Omega$m imaće se, na primer, prema (5.103)

$$D_e = 658 \cdot \sqrt{\frac{60}{50}} = 723\ \text{m}.$$

Na osnovu (5.86) dobija se

$$x = 0{,}1445 \log \frac{723 \cdot 2}{0{,}031} = 0{,}675\ \Omega/\text{km}.$$

Za $r=0{,}755\ \Omega/\text{km}$ i $l=500$ m biće, saglasno (6.85),

$$\underline{Z}_1=(0{,}755+j\,0{,}675)\,0{,}5=0{,}51\,e^{j41{,}8°}\ \Omega.$$

Ako je $\underline{Z}_2=4\ \Omega$, iz (6.94) i (6.89) se dobija

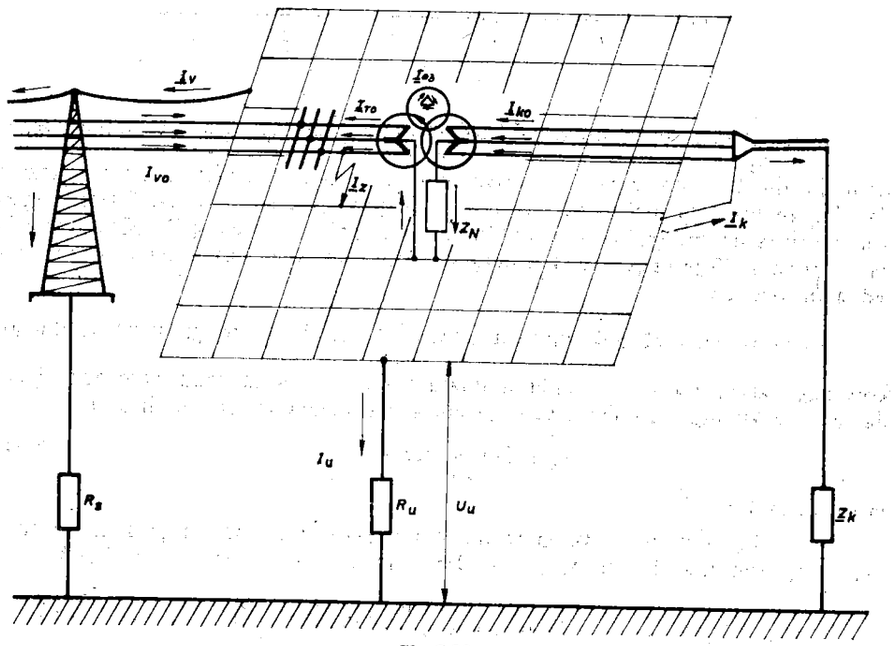
$$\underline{Z}_u=\frac{4}{\sqrt{2\dfrac{4}{0{,}51}e^{-j41{,}8°}+1}}=0{,}99\cdot e^{j19{,}7°}\ \Omega.$$

6.5. TRANSFORMATORSKE STANICE VISOKI/SREDNJI NAPON

6.5 1. RASPODELA STRUJA U SISTEMU UZEMLJENJA

Za dimenzionisanje uzemljenja TS visoki/srednji napon kritični su obično kvarovi na strani mreže visokog napona pošto su ove po pravilu efikasno uzemljene i imaju znatne struje zemljospojeva.

Raspodela struja u sistemu uzemljenja TS za slučaj zemljospoja na strani visokog napona pokazana je na sl. 6.22.

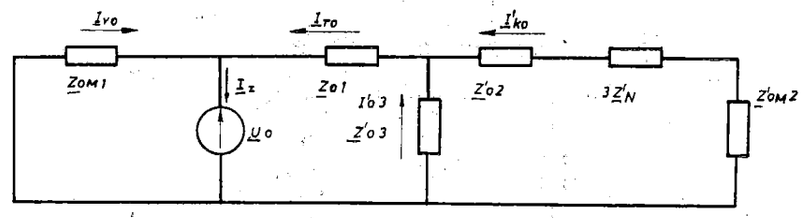


Sl. 6.22

Na slici je kod trofaznih elemenata prikazan tok isključivo nultih komponenti struja budući da ove, kako je poznato, određuju vrednosti struja u sistemu uzemljenja. Nacrtan je samo jedan napojni (vazdušni) vod i jedan odlazeći srednje-naponski

(kablovski) vod, radi jednostavnosti. Analiza izvedena za razmatrani slučaj, lako se, kako će se pokazati, uopštava za slučaj više vodova na oba naponska nivoa, vazdušnih ili kablovskih.

Proračun nultih komponenti struja za kvar na naznačenom mestu može se izvesti preko šeme nultog redosleda, prikazane na sl. 6.23. Iz šeme su izostavljene otpornosti uzemljenja koje su obično znatno manje od impedansi elemenata postrojenja i praktično ne utiču na vrednosti razmatranih struja.



Sl. 6.23

Parametri $\underline{Z}_{01}$, $\underline{Z}_{02}$ i $\underline{Z}_{03}$ predstavljaju impedanse zamenske šeme transformatora, a $\underline{Z}_{0M1}$ i $\underline{Z}_{0M2}$ su nulte impedanse mreža visokog i srednjeg napona određene iz postrojenja. Apostrof označava da su odgovarajuće veličine i parametri svedeni na stranu visokog napona.

Napon $\underline{U}_0$ zavisi, kako je pokazano u Poglavlju 1, od vrste zemljospoja, napona na mestu kvara u normalnom režimu i impedansi mreže α i 0 redosleda za mesto kvara.

Obično je

$$\underline{I}_{k0}\ll\underline{I}_{v0} \tag{6.95}$$

pošto je grana šeme u kojoj teče struja $\underline{I}_{k0}$ praktično premošćena impedansom $\underline{Z}_{03}$ koja obuhvata uticaj namotaja transformatora spregnutog u trougao. Znatnije struje $\underline{I}_{k0}$ mogu se imati samo u slučajevima ako je srednjenaponska mreža tačno kompenzovana, o čemu je bilo reči u 4.5.

Kako se vidi sa sl. 6.22, struja kroz uzemljivač postrojenja I_u, merodavna za proračun napona dodira i koraka, predstavlja samo deo struje zemljospoja I_z. Detaljan raspored struja u sistemu uzemljenja prikazan je šematski na sl. 6.24.

Može se zapaziti da se struja $3\,\underline{I}_{T0}$, iako zajedno sa $3\,\underline{I}_{v0}$ gradi struju zemljospoja, ne odvodi u zemlju i ne mora se obuhvatiti pri električnom proračunu uzemljivača. Pomenuta struja protiče po provodnicima uzemljivača od mesta kvara nazad u neutralnu tačku transformatora na strani visokog napona.

Deo preostale struje kvara odvodi se sa uzemljivača i preko zaštitnog provodnika vazdušnog voda i plašta kabla (sl. 6.22).

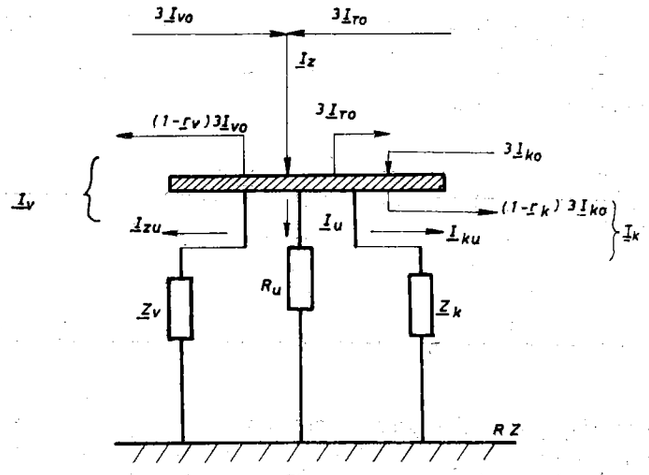
Za pomenute struje može se približno napisati

$$\underline{I}_v=(1-\underline{r}_v)\,3\,\underline{I}_{v0}+\underline{I}_{zu} \tag{6.96}$$

$$\underline{I}_k=(1-\underline{r}_k)\,3\,\underline{I}_{k0}+\underline{I}_{ku} \tag{6.97}$$

Prvi članovi u (6.96) i (6.97) predstavljaju komponente struje pod uticajem elektromagnetne sprege provodnika faza i zaštitnog voda odnosno kabla, kako se jednostavno zaključuje iz (5.149) i (5.150). Pomenute komponente postoje, razume se, samo kod vodova kroz čije provodnike teku nulte struje kod nastalog kvara.

Drugi članovi u (6.96) i (6.97), označavaju struje koje se odvode preko zaštitnog provodnika i plašta kabla u zemlju usled podizanja potencijala uzemljivača.



Sl. 6.24

Primenom prvog Kirhofljevog zakona na uzemljivač, prema šemi na sl. 6.24. dobija se

$$\underline{I}_u = 3\,\underline{I}_{v0} - (1-\underline{r}_v)\,3\,\underline{I}_{v0} - \underline{I}_{zu} + 3\,\underline{I}_{T0} - 3\,\underline{I}_{T0} + 3\,\underline{I}_{k0} - (1-\underline{r}_k)\,3\,\underline{I}_{k0} - \underline{I}_{ku},$$

odnosno, posle sređivanja,

$$\underline{I}_u = \underline{r}_v\,3\,\underline{I}_{v0} + \underline{r}_k\,3\,\underline{I}_{k0} - \underline{I}_{zu} - \underline{I}_{ku}. \tag{6.98}$$

Pri korišćenju (6.98) treba imati u vidu da sve struje imaju svoje stvarne vrednosti, tj. nisu svedene u zajedničko galvansko područje kao u šemi na sl. 6.23.

Ako sa $\underline{Z}_v$ i $\underline{Z}_k$ označimo otpornost zaštitnog provodnika i kabla koje ovi elementi suprotstavljaju odvođenju struja u zemlju, može se pisati (sl. 6.24)

$$\underline{I}_{zu} + \underline{I}_{ku} = \underline{U}_u \left(\frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k}\right). \tag{6.99}$$

Imajući u vidu (6.5), iz (6.98) i (6.99) se dobija

$$\underline{I}_u = \frac{\underline{r}_v\,3\,\underline{I}_{v0} + \underline{r}_k\,3\,\underline{I}_{k0}}{1 + R_u\left(\frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k}\right)}. \tag{6.100}$$

Struja $\underline{I}_u$ predstavlja osnovnu veličinu za proračun napona dodira i koraka kod uzemljivača.

U praktičnim proračunima često je podesno izračunavanje napona U_u preko rezultantnog otpora rasprostiranja povezanih uzemljenih delova (sl. 6.24)

$$\underline{U}_u = (\underline{r}_v\,3\,\underline{I}_{v0} + \underline{r}_k\,3\,\underline{I}_{k0}) \cdot \underline{Z}_e, \tag{6.101}$$

gde je

$$\underline{Z}_e = \left(\frac{1}{R_u} + \frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k}\right)^{-1}. \tag{6.102}$$

Izvedene relacije lako se uopštavaju za slučaj kada iz TS polazi veći broj vazdušnih i kablovskih vodova, na oba naponska nivoa.

Tako se za struju uzemljivača može pisati

$$\underline{I}_u = \frac{3\sum_i \underline{r}_i\,\underline{I}_{i0}}{1 + R_u \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_i}}. \tag{6.103}$$

Sume u (6.103) obuhvataju sve vodove koji polaze iz postrojenja.

Napon uzemljivača i ukupna impedansa uzemljenja mogu se u posmatranom slučaju odrediti prema izrazima

$$U_u = 3\sum_i \underline{r}_i\,\underline{I}_{i0} \cdot \underline{Z}_e, \tag{6.104}$$

$$\underline{Z}_e = \left(\frac{1}{R_u} + \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_i}\right)^{-1}. \tag{6.105}$$

U (6.103) i (6.105) učinjena je pretpostavka da se otpornost uzemljenja uzemljivača TS i odlazećih vodova mogu smatrati paralelno vezanim. Pomenuta pretpostavka ne odgovara u potpunosti stvarnim uslovima zbog uzajamnog uticaja uzemljenih delova, »ekraniranja«, koji unekoliko smanjuje mogućnosti odvođenja struja u odnosu na prilike kada bi ovi delovi bili prostorno udaljeni jedan od drugog. Pojava ekraniranja nije međutim izrazita kod zaštitne užadi vazdušnih vodova, a ni kod kablova sa izolacionim spoljnim omotačem. Kod prvih, uzemljivači stubova koji određuju otpor $\underline{Z}_v$ nalaze se dovoljno prostorno udaljeni od uzemljivača postrojenja tako da se mogu smatrati praktično van zone njegovog uticaja. Kablovi sa izolacionim spoljnim omotačem nisu sami uzemljivači već predstavljaju samo galvanske veze uzemljivača posmatrane TS i drugih postrojenja mreže.

Kod obe pomenute vrste vodova postoji izvestan međusobni elektromagnetni uticaj pri paralelnom vođenju, koji unekoliko menja podužne impedanse zaštitnog provodnika i plašta. Ovi se uticaji mogu, kao najčešće drugostepeni, zanemariti kod praktičnih analiza.

Kablovi sa neizolovanim metalnim spoljnim omotačem (ili uzemljivačke trake položene pored kablova) ponašaju se i kao uzemljivači i kao spone sa uzemljivačima susednih postrojenja. Oba pomenuta efekta mogu se obuhvatiti samo približno zbog osetnog međusobnog uticaja uzemljivača postrojenja i kablova kao i kablova međusobno, koji uplivišu kako na otpor rasprostiranja uzemljivača, tako i neposredno na raspodelu potencijala na površini tla i potencijalne razlike dodira i koraka. U praktičnim proračunima ovde se može postupiti na sledeći način.

Kablovi se u dužini od reda 100÷200 m računato od postrojenja, mogu smatrati elementima uzemljivača postrojenja. Uticaj ovih deonica kablova na karakteristične veličine uzemljenja obuhvata se kompleksnom analizom ekvivalentnog sistema uzemljenja koje čine uzemljivač postrojenja i kablovi, primenom računara [88, 89] (tačka 6.5.3).

Ako se želi obuhvatiti i uticaj razmatranih kablova kao spona sa uzemljivačima susednih postrojenja, u (6.103) do (6.105) treba uvrstiti impedanse uzemljenja kablova, saglasno tački 6.4.1, odbijajući od njihove dužine deonice preko kojih su bili zamenjeni u proračunima raspodele potencijala. Ovde svakako treba voditi računa o međusobnoj blizini kablova kao i postrojenja u koja odlaze kako bi se procenili uzajamni uticaji koji kvare uslove uzemljenja.

U našim razmatranjima pretpostavili smo da kablovi distributivne mreže imaju metalne plaštove i da su ovi uzemljeni na oba kraja. Pomenuti uslovi mogu se smatrati prirodnim i uobičajenim. U izvesnim slučajevima mogu se, da bi se sprečilo iznošenje potencijala iz postrojenja, prekidati plaštevi kablova ugradnjom umetaka od izolacionog omotača ili ostavljati neuzemljeni krajevi (tačka 6.5.4). U (6.103) do (6.105) za odgovarajuće kablove treba uvrstiti $r_i=1$ i $Z_i\to\infty$.

6.5.2. PRORAČUN KARAKTERISTIČNIH VELIČINA

Karakteristične veličine mrežastih horizontalnih uzemljivača kakvi se izvode u razmatranim postrojenjima, mogu se dobro proceniti primenom jednostavnih praktičnih formula poluempirijskog karaktera. U pojedinim kritičnim slučajevima kada su uslovi uzemljenja nepovoljni tako da se propisane norme bezbednosti teško zadovoljavaju, potrebni su posebni oblici uzemljivača i tačniji proračuni raspodele potencijala, što će zahtevati modelovanje sistema uzemljenja na računaru [88, 89] ili u elektrolitičkoj kadi. Relacije koje će biti date u narednom izlaganju mogu se sa uspehom primeniti na sve uobičajene oblike uzemljivača pretežno mrežaste strukture.

Otpor rasprostiranja mrežastih uzemljivača u homogenom tlu može se proceniti prema formulama Lorana (Laurent) [90, 91]

$$R_u\approx\frac{\rho}{2D}+\frac{\rho}{L} \tag{6.106}$$

ili

$$R_u\approx 1{,}6\,\frac{\rho}{P}+0{,}6\,\frac{\rho}{L}. \tag{6.107}$$

U (6.106) je sa D označen prečnik horizontalne kružne ploče čija je površina jednaka površini S koju zahvata uzemljivač.

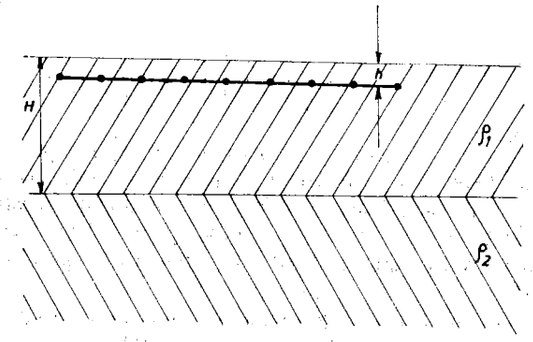
Tako je

$$D=\sqrt{\frac{4}{\pi}}\sqrt{S}=1{,}128\cdot\sqrt{S}. \tag{6.108}$$

Simbolom L označena je ukupna dužina elemenata uzemljivača. Ako uzemljivač ima i vertikalne elemente u L treba uključiti i njihovu dužinu. Parametar P predstavlja efektivni obim spoljne konture uzemljivača, bez uvažavanja njene mestimične izlomljenosti.

Prvi članovi u (6.106) i (6.107) predstavljaju otpornost uzemljenja kružne ploče koja je po svojoj površini, odnosno po svom spoljnjem obimu ekvivalentna mrežastom uzemljivaču postrojenja. Drugim članovima obuhvata se, približno, povećanje otpornosti usled konačne gustine traka uzemljivača.

Formulama (6.106) i (6.107) nisu obuhvaćeni pojedini konstruktivni parametri uzemljivača, kao što su dubina polaganja, oblik i dimenzije poprečnog preseka provodnika, dimenzije okaca mreže i dr., koji su od manjeg uticaja.



Sl. 6.25

Tlo u koje se polaže uzemljivač je često nehomogeno sa manje ili više izraženom dvoslojnom strukturom (sl. 6.25). U [90] se u pomenutom slučaju predlaže formula

$$R_u\approx 1{,}6\,\frac{\rho_2}{P}+0{,}6\,\frac{\rho_1}{L}, \tag{6.109}$$

gde je sa ρ_1 označena specifična otpornost gornjeg, a sa ρ_2 donjeg sloja. Pri tom se pretpostavlja da uzemljivač leži u gornjem sloju i da je debljina ovog sloja mala prema linearnim dimenzijama uzemljivača, na primer

$$\frac{H}{\sqrt{S}}\leqslant 0{,}05. \tag{6.110}$$

Uz iste se pretpostavke ravnopravno sa (6.109) može koristiti i formula

$$R_u\approx\frac{\rho_2}{2D}+\frac{\rho_1}{L}. \tag{6.111}$$

Kada je ρ_2 nekoliko puta manje od ρ_1 a uslov (6.110) nije ispunjen, može se umesto (6.109) i (6.111) koristiti formula

$$R_u\approx\frac{\rho_2}{2D}+\frac{\rho_1}{L}+\frac{(H-h)\,\rho_1}{S}. \tag{6.112}$$

Poslednji član u (6.112) obuhvata približno otpornost na koju nailazi struja pri prolazu kroz gornji do donjeg sloja uz pretpostavku da struje teku pravolinijski i normalno na graničnu ravan između slojeva. Sa h je označena dubina ukopavanja uzemljivača.

Potencijalne razlike koraka i dodira kod mrežastih uzemljivača mogu se približno izračunati primenom empirijskih formula

$$E_d = k_d \rho \frac{I_u}{L}, \tag{6.113}$$

$$\left(E_k = k_k \rho \frac{I_u}{Lh}\right). \tag{6.114}$$

Parametri u izrazima (6.113) i (6.114) imaju isto značenje kao ranije. Sa k_d i k_k označeni su karakteristični koeficijenti koji zavise u određenoj meri od geometrijskih karakteristika uzemljivača. U literaturi se obično usvaja $k_d=0{,}6 \div 1{,}4$ i $k_k=0{,}10 \div 0{,}16$, mada je u nekim slučajevima utvrđeno da prvi od pomenutih faktora može da ima i vrednosti do reda 2 kod ivičnih i ugaonih okaca uzemljivačke mreže [90, 91].

Analiza raspodele potencijala izvedena na nizu kvadratnih i pravougaonih uzemljivača različitih geometrijskih karakteristika [121] pokazala je da se dobre ocene sačinioca k_d mogu dobiti iz formule

$$k_d = 0{,}9 + 0{,}1 \left| \frac{\sqrt{S}}{b} - 2{,}5 \right| + 0{,}0248 \left| \sqrt{S} - 10 \right|^{0{,}72}. \tag{6.115}$$

U (6.115) je sa b označena prosečna širina okaca uzemljivača. Kod pravougaonih uzemljivača za b treba uzeti geometrijsku srednju vrednost širina okca. Navedena formula se može primeniti na približno simetrične uzemljivače sa

$$10\ \text{m} \leqslant \sqrt{S} \leqslant 200\ \text{m}, \quad 0{,}5\ \text{m} \leqslant h \leqslant 1\ \text{m} \quad \text{i} \quad 2 \leqslant \frac{\sqrt{S}}{b} \leqslant 8.$$

Kod nehomogenog tla mogu se takođe orijentaciono koristiti relacije (6.113) i (6.114) ako se u ove uvrsti specifična otpornost gornjeg sloja tla.

Potpuniji izrazi za R_u, E_d, i E_k za mrežaste kvadratne uzemljivače u homogenom i dvoslojnom tlu, koji obuhvataju uticaj svih geometrijskih parametara uzemljivača, dati su u [92, 93].

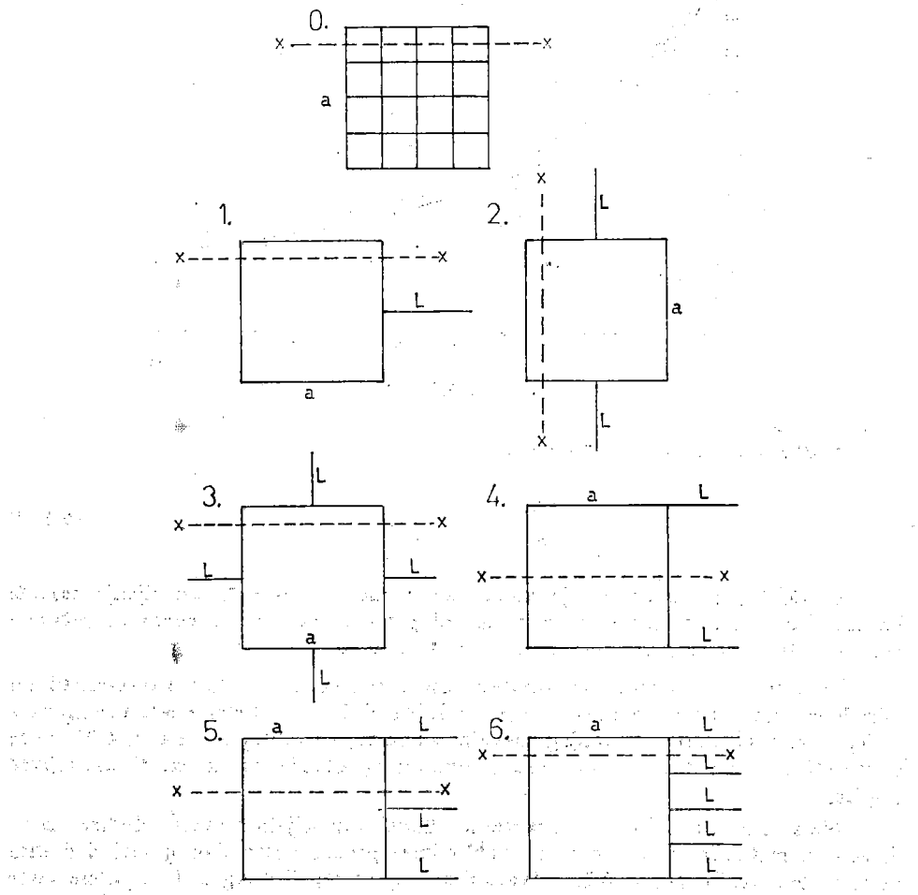
6.5.3. KABLOVI KAO ELEMENTI UZEMLJIVAČA

Uticaj kablova sa metalnim plaštom neizolovanim od tla i drugih metalnih provodnika u tlu vezanih za uzemljivač postrojenja najtačnije se obuhvata analizom sistema uzemljenja koji pomenuti provodnici grade sa uzemljivačem postrojenja, primenom računara ili fizičkim modelovanjem.

Ovakvi proračuni izvedeni su za nekoliko karakterističnih konfiguracija uzemljivača i kablova prikazanih na sl. 6.26 [94].

Skica sa oznakom »0« predstavlja uzemljivač postrojenja, a na skicama 1 do 6 prikazane su proučavane konfiguracije pomenutog uzemljivača i pravolinijskih provodnika (kablova). Isprekidana prava linija x—x označava pravac na površini tla na kome je računata raspodela potencijala i određene potencijalne razlike dodira i koraka.

Kako je pokazano u 6.4.1, podužni padovi napona na plaštu kabla mogu se smatrati zanemarljivim kod dužina ne većih od reda 100÷200 m, a u slučaju visokih vrednosti ρ (na primer $\rho \approx 500\ \Omega$m) i kod dužina do reda 400÷500 m. S obzirom na navedeno, pravolinijski provodnici mogu da, u pomenutim uslovima, zadovoljavajuće modeluju kablove kao uzemljivače.



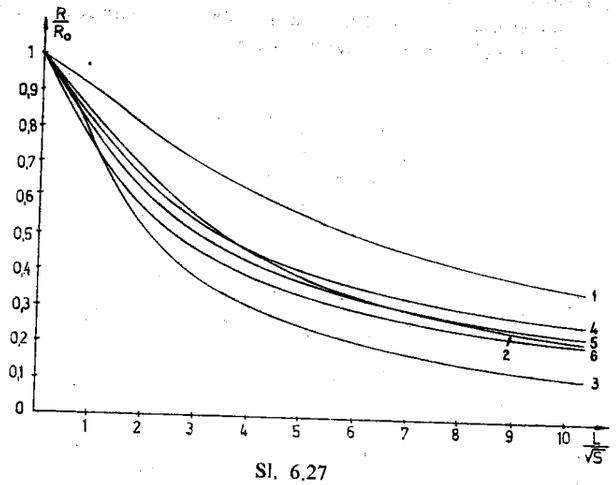
Sl. 6.26

Na sl. 6.27 prikazan je odnos otpornosti uzemljenja mrežastog uzemljivača kada su za njega povezani metalni provodnici (kablovi) saglasno šemama 1 do 6 na sl. 6.26, prema otpornosti uzemljenja samog mrežastog uzemljivača, R_0. Pomenuti parametar prikazan je kao funkcija odnosa dužine trake prema linearnoj meri uzemljivača $\sqrt{S}$, gde je sa S označena površina koju uzemljivač zahvata.

U opštem je slučaju, kao što je poznato (na primer [98]), otpornost uzemljenja određene konfiguracije uzemljivača direktno srazmerna specifičnoj otpornosti tla

$$R = \rho r. \tag{6.116}$$

Koeficijent srazmere »r« predstavlja koeficijent otpornosti koji je određen isključivo oblikom uzemljivača.



Sl. 6.27

S obzirom na (6.116) dobija se

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\rho r}{\rho r_0} = \frac{r}{r_0}. \tag{6.117}$$

Iz (6.117) proizilazi da je analizirani odnos otpornosti uzemljenja takođe karakteristični parametar koji ne zavisi od ρ tla za koje su izvedeni proračuni i važi u opštem slučaju za posmatranu konfiguraciju.

Parametar $L/\sqrt{S}$ može se smatrati osnovnom geometrijskom karakteristikom određene kombinacije uzemljivača i provodnika, dok su broj elemenata uzemljivača i njegov stvarni oblik od manjeg značaja. Zbog toga se dijagram na sl. 6.27 može primeniti za orijentacionu procenu razmatranog uticaja na mrežasti uzemljivač uopšte.

Na sl. 6.28 dati su u vidu dijagrama odnosi potencijalnih razlika dodira uzemljivača sa metalnim provodnicima (kablovima) prema potencijalnoj razlici dodira samog uzemljivača. Na sl. 6.29 prikazani su odgovarajući dijagrami za potencijalne razlike koraka. Potencijalne razlike dodira određene su za površinu nad uzemljivačem, a potencijalne razlike koraka za kritična mesta van uzemljivača.

Proračuni su izvedeni za sve skice uzemljivača i provodnika sa sl. 6.26, a dobijene krive za pojedine skice označene su odgovarajućim brojevima.

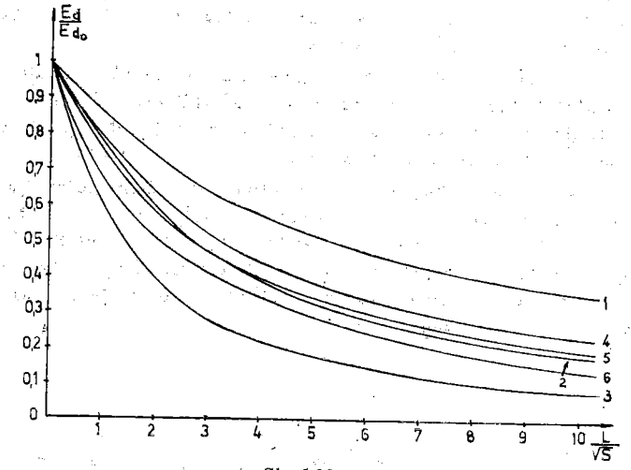
Potencijalne razlike dodira i koraka određenog uzemljivača mogu se računati prema opštoj formuli [98].

$$E = c\,\rho\,I_u \tag{6.118}$$

gde je sa »c« označen koeficijent proporcionalnosti koji zavisi isključivo od geometrijskih karakteristika uzemljivača.

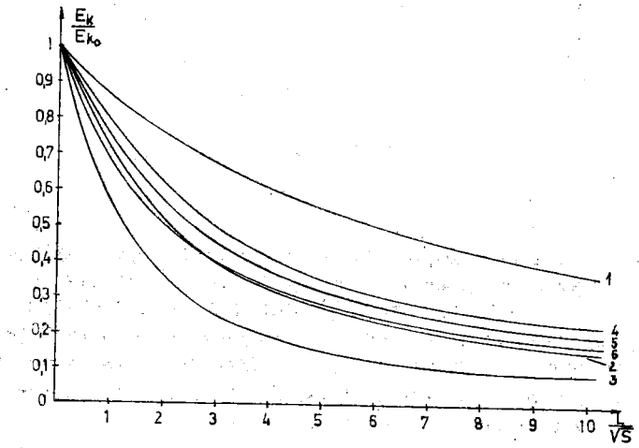
Na osnovu (6.118) je

$$\frac{E}{E_0} = \frac{c\,\rho\,I_u}{c_0\,\rho\,I_u} = \frac{c}{c_0} \tag{6.119}$$



Sl. 6.28

iz čega se zaključuje da analizirani odnos potencijalnih razlika takođe ne zavisi od usvojenih vrednosti za ρ i I_u pri proračunima, već važi za proučavane slike uzemljivača i provodnika u opštem slučaju.



Sl. 6.29

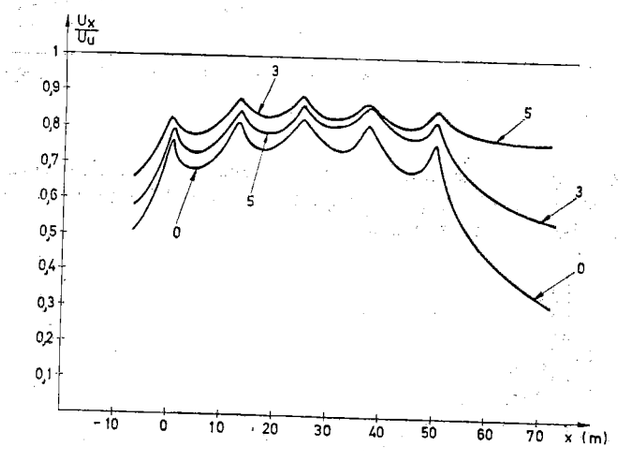
Navedeni dijagrami mogu poslužiti za orijentacionu procenu uticaja provodnika (kablova) na tipične mrežaste uzemljivače generalno, pošto analizirani odnosi potencijalnih razlika ne zavise osetno od pojedinih detalja oblika uzemljivača, broja njegovih elemenata, njihovog preseka i drugih parametara.

Kako se vidi iz priloženih dijagrama, dopunski provodnici u tlu (kablovi) utiču osetno na sve razmatrane karakteristike uzemljivača.

Najveće smanjenje otpora i potencijalnih razlika za određeno $L/\sqrt{S}$ ima se kod provodnika ravnomerno raspoređenih po obimu uzemljivača (šema 3, sl. 6.26) kada je uzajamno ekraniranje provodnika najmanje i ovi utiču na izravnavanje potencijala po celoj površini postrojenja.

Dijagrami na sl. 6.27 do sl. 6.29 pokazuju da između uticaja dva, tri ili pet provodnika vođenih paralelno od jedne ivice uzemljivača (šema 4, 5 i 6, sl. 6.26) nema bitne razlike. Pomenuta pojava posledica je međusobnog uticaja provodnika usled koga se smanjuje njihova sposobnost odvođenja struja.

Na sl. 6.30 je radi ilustracije prikazana raspodela potencijala duž pravca x—x za sam mrežasti uzemljivač i za šeme 3 i 5 (sl. 6.26). Na ordinatu dijagrama nanete su vrednosti potencijala tačaka svedene na napon uzemljivača, a na apscisu njihove koordinate na posmatranom pravcu. Slika pokazuje pozitivan uticaj dodatnih provodnika (kablova) na smanjivanje gradijenta potencijala, kako na teritoriji uzemljivača, tako i van njega.



Sl. 6.30

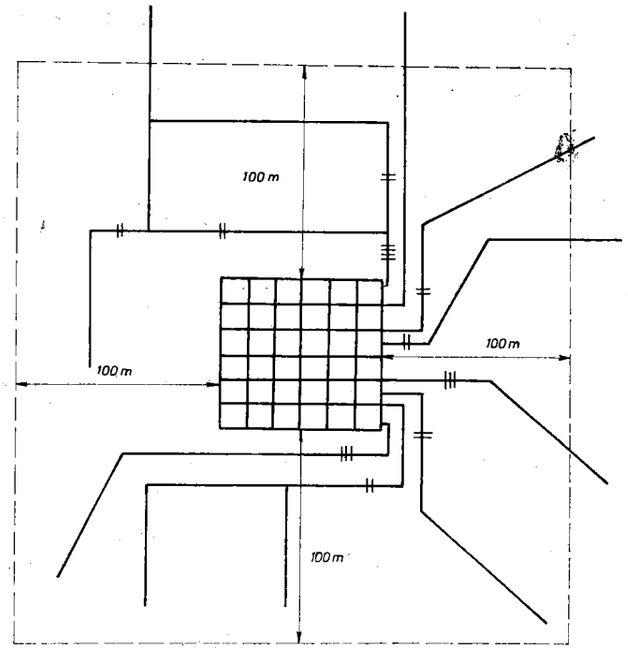
Uticaj kablova kao uzemljivača može se približno obuhvatiti primenom datih dijagrama. Sve karakteristične veličine uzemljivača proračunavaju se prema ranije opisanom postupku, kao da kablovi na dužini L imaju izolacioni omotač. Tako dobijene vrednosti kroguju se onda prema priloženim dijagramima na taj način što se množe odnosima R/R_0, E_d/E_{d0} i E_k/E_{k0} koji odgovaraju šemi vezivanja uzemljivača i kablova i postojećem odnosu $L/\sqrt{S}$. Dužinu L ne treba uzimati većom od efikasne dužine kabla kao uzemljivača.

Ako iz postrojenja polazi veliki broj kablova koji gusto prekrivaju okolni prostor, može se smatrati da je time proširena uzemljivačka mreža. Kod proračuna karakterističnih veličina uzemljenja u izrazima (6.106) do (6.109) i (6.111) do (6.114) treba, prema tome, samo u odgovarajućoj meri povećati parametre S i L.

Način proračuna uzemljivača biće prikazan na primeru jedne gradske TS 110/10 kV. Pomenuta TS napaja se preko tri jednožilna kabla 110 kV sa olovnim

plaštom i spoljnom PVC izolacijom. Redukcioni faktor kablovskog voda iznosi $0{,}37\ e^{j\,68{,}3°}$. Struja jednofaznog zemljospoja kod kvara u postrojenju sa strane kabla 110 kV ima vrednost 15 kA. Transformatori 110/10 kV su sprege Yyod5. Uzemljivač postrojenja ima parametre $S=60\times 80$ m^2, $h=0{,}7$ m, $L=1200$ m. U ukupnu dužinu L uračunate su i dužine armirano-betonske osnove zgrade. Specifična otpornost tla je $\rho=60$ Ωm.

Iz postrojenja polazi 20 kablova IPO 13, kako je pokazano na sl. 6.31.



Sl. 6.31

Kablovi IPO 13, gusto pokrivaju površinu oko postrojenja i mogu se smatrati elementima uzemljivača. Efektivna dužina pomenutih kablova kao uzemljivača za $\rho=60$ Ωm iznosi oko 100 m. Kada kablovi leže u tlu sa povišenim potencijalom, usled uticaja uzemljivača postrojenja i susednih bliskih kablova, pomenuta dužina se povećava. Može se, zato, u prvoj približnosti smatrati da kao elementi uzemljivača kablovi deluju u pravougaonom prostoru koji je dobijen translatornim pomeranjem granica uzemljivača postrojenja za 100 m (sl. 6.31).

Za ekvivalentni uzemljivač će se imati, saglasno (6.108),

$$D = 1{,}128 \cdot \sqrt{(2\cdot 100+80)\,(2\cdot 100+60)} = 304{,}4 \text{ m}.$$

Ukupna dužina kablova na površini ekvivalentnog uzemljivača, određena prema sl. 6.31, iznosi 1500 m. Kod proračuna pomenute dužine kablovi koji su položeni u isti rov su na celoj dužini paralelnog vođenja računati kao jedan kabl.

Na osnovu (6.106) ima se

$$R_u = \frac{60}{2 \cdot 304{,}4} + \frac{60}{1200 + 1500} = 0{,}121\ \Omega.$$

Uticaj kablova 10 kV kao veza sa uzemljivačima u mreži 10 kV i 0,4 kV obuhvatićemo samo za četiri kabla koji leže približno po dijagonalama ekvivalentnog uzemljivača. Na ovaj se način uzima u obzir uticaj međusobnog ekraniranja kablova.

Ako je za kablove $\underline{Z}_u = 0{,}49 \cdot e^{j30}\ \Omega$, prema (6.103) dobija se

$$\underline{I}_u = \frac{0{,}37 \cdot e^{j68{,}3^\circ}\ 15000}{1 + 0{,}121 \dfrac{4}{0{,}49} e^{-j30}} = 2900\, e^{j83{,}2^\circ}\ \text{A}.$$

Za $k_d = 2$, koliko se može usvojiti s obzirom da ekvivalentni uzemljivač nije simetričan, iz (6.113) se za potencijalnu razliku dodira na prostoru ekvivalentnog uzemljivača ima

$$E_d = 2 \cdot 60 \frac{2900}{1200 + 1500} = 129\ \text{V}.$$

Potencijalna razlika koraka na prostoru ekvivalentnog uzemljivača biće, saglasno (6.114),

$$E_k = 0{,}16 \cdot 60 \frac{2900}{(1200 + 1500)\, 0{,}7} = 14{,}73\ \text{V}.$$

U slučaju da su kablovi 10 kV sa izolovanim metalnim plaštom, otpornost uzemljenja R_u bila bi određena isključivo dimenzijama uzemljivača postrojenja.

Sada bi bilo

$$D = 1{,}128 \cdot \sqrt{80 \cdot 60} = 78{,}15\ \text{m}$$

$$R_u = \frac{60}{2 \cdot 78{,}15} + \frac{60}{1200} = 0{,}43\ \Omega.$$

Neka su impedanse uzemljenja kablova 10 kV $0{,}99\, e^{j19{,}7^\circ}\ \Omega$ (tačka 6.4.2). Pošto ovog puta ne postoji galvanski međusobni uticaj kablova i uzemljivača, kod proračuna I_u mogli bi se obuhvatiti svi kablovi 10 kV. Sigurnosti radi, a imajući u vidu uzajamni elektromagnetni uticaj blisko vođenih kablova koji povećava u izvesnoj meri impedansu plašta kabla, kablovi koji na većoj dužini leže u istom rovu se mogu smatrati kao jedan kabl. U razmatranom slučaju proračuni će se izvesti kao da postrojenje ima osam kablova.

Prema (6.103) dobija se

$$\underline{I}_u = \frac{0{,}37\, e^{j68{,}3^\circ}\ 15\,000}{1 + 0{,}43 \cdot \dfrac{8}{0{,}99} e^{-j19{,}7^\circ}} = 1\,191\, e^{j84{,}9^\circ}\ \text{A}.$$

Potencijalne razlike koraka i dodira kod uzemljivača postrojenja biće

$$E_d = 1{,}4 \cdot 60 \frac{1\,191}{1\,200} = 83{,}37\ \text{V},$$

$$E_k = 0{,}16 \cdot 60 \frac{1\,191}{1\,200 \cdot 0{,}7} = 13{,}6\ \text{V}.$$

U drugom od razmatranih slučajeva posebna pažnja mora se posvetiti izlazećem potencijalu i naponima dodira i koraka van postrojenja kod TS 10/0,4 kV i drugih objekata mreža 10 i 0,4 kV. Uticaj kablova kao uzemljivača, koji se ima kod kablova sa neizolovanim plaštom, doprinosi podizanju opšteg nivoa potencijala na području TS i njegovom izjednačavanju tako da se uslovi bezopasnosti lakše postižu (Tačka 6.5.4).

6.5.4. KRITERIJUMI ZA DIMENZIONISANJE UZEMLJIVAČA

Naponi koraka i dodira

Uzemljivač postrojenja treba da zadovolji propisane uslove u pogledu napona dodira i koraka.

Propisi će biti ispunjeni ako je, saglasno (6.8) i (6.11),

$$U_d = \frac{E_d}{s_d} \leqslant U_{dd} \tag{6.120}$$

i istovremeno

$$U_k = \frac{E_k}{s_k} \leqslant U_{kd}. \tag{6.121}$$

U (6.120) je sa U_{dd} označen dozvoljeni napon dodira unutar postrojenja ako se, kao što je to slučaj u jugoslovenskim propisima, različito normiraju vrednosti unutar i van postrojenja (Odeljak 6.2). Pri tom se polazi od pretpostavke da ograda TS nije povezana sa uzemljivačem, tako da do opasnih dodira ne može da dođe sa spoljne strane, što bi se u gradskim uslovima moralo smatrati verovatnim i ujedno kritičnijim slučajem.

Sa U_{kd} označen je dozvoljeni napon koraka van postrojenja, ako propisi i ovde prave razlike prema mestu električnog udara kao, na primer, važeći jugoslovenski propisi. Pri tom za gradska postrojenja treba smatrati da se radi o prometnim površinama. Kod proračuna sačinioca s_k, međutim, treba uvažiti realne uslove van postrojenja, tj. postojanje asfalta ili kamene i druge prekrivke.

Izlazeći potencijal

Proračuni uzemljivača pojedinih gradskih TS 110/10 kV u Beogradu pokazali su da se kao kritičan ograničavajući faktor kod velikih vrednosti struja jednofaznih zemljospojeva na strani 110 kV javlja izlazeći potencijal koji preko plašteva kablova prelazi u objekte mreže 10 kV i dalje u mrežu 0,4 kV i instalacije potrošača na niskom naponu.

Kako je pokazano u 6.4, napon koji se preko plašta kabla iz razmatranog postrojenja prenese u TS srednji/niski napon približno se procenjuje po formuli

$$U_i = k_i\, U_u. \tag{6.122}$$

Veličina U_i predstavlja ujedno i napon na koji dolazi uzemljivač TS srednji/niski napon, a i napon na neutralnom provodniku mreže niskog napona ako su pomenute TS izvedene sa objedinjenim uzemljivačem.

U slučaju da je mreža niskog napona nulovana, U_i predstavlja i napon koji će se pojaviti na nulovanim aparatima pomenute mreže.

Potencijalna razlika dodira kod TS srednji/niski napon i objekata mreže niskog napona manja je od napona U_i pošto se stajna mesta ne nalaze na nultom potencijalu, usled uticaja uzemljivača i drugih metalnih delova u tlu koji odvode struje kvara.

Tako se može pisati

$$E_d = f_d\, U_i, \tag{6.123}$$

gde se sačiniocem $f_d \leqslant 1$ obuhvata uticaj izjednačenosti potencijala. U slučaju idealne izjednačenosti potencijala, koja se može postići u stambenim objektima, ima se $f_d \approx 0$.

Merenjima izvedenim kod niza objekata 10 i 0,4 kV mreža Beograda utvrđene su vrednosti sačinioca f_d navedene u Tabeli 6.3 [97].

TABELA 6.3

OBJEKAT		f_d
TS 10/0,4 kV		≈0,3
razvodni kablovski ormani 0,4 kV		0,45 ÷ 0,72
stubovi vazdušne mreže 0,4 kV		0,6 ÷ 0,8
Neuzemljeni kandelabri za ulično osvetljenje		0,61 ÷ 0,96
Kablovske priključne kutije na zidovima zgrada		0,06 ÷ 0,66
Stambeni objekti	kuhinje	0,03 ÷ 0,06
	kupatila	0,04 ÷ 0,4 *)

*) Merene su potencijalne razlike između uzemljenog kućišta mašine za pranje rublja i kade kod dovođenja napona na kućište. Velike vrednosti f_d izmerene su kod kada sa plastičnim slivnicima.

Napon dodira usled izlazećeg potencijala jednak je, saglasno (6.8), (6.122) i (6.123),

$$U_d = \frac{f_d\, k_i}{s_d}\, U_u. \tag{6.124}$$

U (6.124) je, razume se, sa s_d označen sačinilac dodira za mesto dodira kod određenog objekta mreže srednjeg ili niskog napona.

Vrednosti sačinioca s_d zavise, saglasno (6.10), od specifične otpornosti tla na mestu stajanja koja određuje prelazni otpor između stopala i tla.

U Tabeli 6.4 navedene su vrednosti specifične otpornosti na karakterističnim stajnim mestima [117]. Pomenute vrednosti izračunate su iz prelaznih otpornosti između pločaste elektrode i odgovarajuće podloge, dobijenih merenjima u stambenim objektima, kao i na pojedinim drugim karakterističnim mestima.

TABELA 6.4

VRSTA TELA	ρ (Ω m)	
	tlo suvo	tlo vlažno
Neglačana hrastovina		
u blizini radijatora	∞	1 850
u sredini prostorije	∞	1 110
kraj zida	14 400	532
Hrastovina glačana voskom nezavisno od stajnog mesta	∞	11 300
Keramičke pločice		
u sredini prostorije	—	3 560
kraj zida	—	500
Pločice od		
fajansa, ispod lavaboa	—	11 500
peščanog kamena (grès), ispod lavaboa	—	1 100
peščanog kamena, u sredini prostorije	—	14 700
Cement		
u sredini prostorije	—	7 550
nad betonom	11 800	438
nad kamenom	∞	5 340
nad posnim betonom položenim preko prirodnog tla	3 000 ÷ 10 000	220 ÷ 250
nad armiranim betonom	—	100 ÷ 150
Pločnik od		
staklenih pločica	∞	∞
metalno armiranih staklenih pločica	6 050	6 050
kamena, u sredini prostorije	∞	24 200
Teracolit		
u sredini prostorije	∞	∞
nad temeljom	—	1 060
kraj zida	—	1 550
kraj radijatora	41 200	930
pohabani deo	24 200	588
kraj vlažnog zida	4 020	525
Prekrivka šljunkom ili sitnim kamenom debljine 10—15 cm nad prirodnim tlom	∞	5 200
Sloj asfalta debljine 2—5 cm*)	∞	∞

*) Prema merenjima u [97].

Željena bezbednost od izlazećeg potencijala postići će se ako kod svih objekata bude zadovoljen uslov (6.120), gde je ovoga puta U_{dd} napon dodira dozvoljen van postrojenja.

Kriterijum koji se sa stanovišta izlazećeg potencijala postavlja pred uzemljivač izvorne gradske TS biće tako, s obzirom na (6.124),

$$U_u \leqslant \frac{s_d}{f_d k_i} U_{dd}. \tag{6.125}$$

Potreban otpor rasprostiranja uzemljivača je, na osnovu (6.125)

$$R_u \leqslant \frac{s_d}{f_d k_i} \frac{U_{dd}}{I_u}. \tag{6.126}$$

Kriterijum (6.125) odnosno (6.126) mora da bude zadovoljen kod svih objekata mreže srednjeg i niskog napona na kojima se može javiti izlazeći potencijal. Pošto se u zagradama, posebno kod novijih naselja, obično imaju male vrednosti f_d a visoke vrednosti s_d, kritičnijim u pogledu izlazećeg potencijala mogu se smatrati razvodne i priključne kablovske kutije i stubovi u mreži niskog napona.

Opasni naponi mogu se pojaviti naročito u slučaju kada se pomenuti objekti nalaze nad dobro provodnim tlom, i u blizini izvorne TS visoki/srednji napon.

Opasnost od izlazećeg potencijala u pomenutim slučajevima izbegava se primenom plastificiranih kablovskih kutija i kablovskih kutija od izolacionog materijala, kao i korišćenjem plastičnih kablova niskog napona bez metalnog plašta. Iz istih razloga može se odustati od nulovanja stubova mreže niskog napona, iako ovo pogoršava uslove bezbednosti kod stubova pojedinačno pri oštećenju izolacije faznih provodnika prema metalnoj konstrukciji. Pomenuto pogoršanje je lokalnog karaktera i predstavlja znatno manju opasnost od one koja se ima prenošenjem izlazećeg potencijala jednovremeno na sve nulovane stubove mreže.

Dobra zaštita od izlazećeg potencijala postiže se, inače, u svim uslovima, asfaltiranjem ili nasipanjem šljunka oko objekta ili, gde to nije moguće, kao na primer na zelenim površinama, oblikovanjem potencijala. Ovim se dobijaju povoljne vrednosti sačinilaca s_d, odnosno f_d.

Kriterijumi (6.125) i (6.126) ne obuhvataju pozitivan uticaj uzemljivača TS visoki/srednji napon i kablova sa neizolovanim metalnim plaštom usled koga se diže opšti nivo potencijala tla u celoj okolini pomenutog postrojenja i tako smanjuju struje koje se odvode preko uzemljivača bliskih TS srednji/niski napon i drugih objekata mreža srednjeg i niskog napona.

Navedeni uticaj može se približno obuhvatiti ako se u (6.123) umesto U_i uvrsti $U_i - V_{ob}$ pri čemu V_{ob} predstavlja potencijal tla oko posmatranog objekta mreže srednjeg ili niskog napona usled uticaja uzemljivača TS visoki/srednji napon i kablova.

Uz uvažavanje V_{ob}, kriterijum (6.126) dobija oblik

$$R_u \leqslant \frac{s_d}{f_d k_i} \cdot \frac{U_{dd}}{I_u} + \frac{1}{k_i} \cdot \frac{V_{ob}}{I_u}. \tag{6.127}$$

Potencijal V_{ob} može se dobiti kompleksnom analizom raspodele potencijala oko TS visoki/srednji napon primenom računara, preko koje se dosta tačno obuhvata

uticaj kablova kao uzemljivača. Naponi dodira i koraka na širokom prostoru oko postrojenja mogu se približno odrediti uvođenjem ekvivalentnog uzemljivača (pogledati primer u Tački 6.5.3), čime se razmatrani proračuni uprošćavaju.

Kod kablova sa izolovanim metalnim plaštom i vazdušnih vodova srednjeg napona kod proračuna V_{ob} u (6.127) može se u prvoj približnosti obuhvatiti samo uzemljivač TS visoki/srednji napon. Ako se pomenuti uzemljivač u razmatranjima zameni kružnom horizontalnom pločom jednake površine, potencijal kod objekta koji je od središnje tačke postrojenja udaljen l metara moći će se proceniti prema relaciji [8]

$$V_{ob} = \frac{\rho I_u}{\pi D} \arcsin \frac{D}{2l} \tag{6.128}$$

gde se D određuje prema (6.108).

Kako je napon uzemljivača

$$U_u = \frac{\rho}{2D} I_u,$$

iz (6.128) sledi

$$V_{ob} = \frac{2}{\pi} U_u \arcsin \frac{D}{2l}. \tag{6.129}$$

Zamenom (6.129) u (6.127), posle sređivanja se dobija, kada se ima u vidu (6.5),

$$R_u \leqslant \frac{s_d}{f_d k_i} \frac{U_{dd}}{I_u} \left(1 - \frac{2}{k_i \pi} \arcsin \frac{D}{2l}\right)^{-1}. \tag{6.130}$$

Neka je, ilustracije radi, najbliža TS 10/0,4 kV u primeru u Tački 6.5.3 kada su kablovi 10 kV sa izolacionim spoljnim omotačem, udaljena od središta postrojenja 110/10 kV, 150 m. Posmatrana TS 10/0,4 nalazi se kao prva na vodu 10 kV koji napaja ukupno 5 takvih TS. Faktor izlazećeg potencijala kod prve TS prema sl. 6.20 i krivoj za $n=5$ i $\frac{Z_1}{Z_2}=0{,}1$ iznosi $k_i \approx 0{,}66$. Pod pretpostavkom da je TS limena i nalazi se na zelenoj površini može se smatrati da je $s_d \approx 1$. Prema Tabeli 6.3 treba kod TS računati sa $f_d \approx 0{,}3$.

Ako zemljospoj u TS 110/10 kV traje 0,2 s, dozvoljeni napon dodira van postrojenja iznosiće prema krivama na sl. 6.6 $U_{dd}=125$ V.

Primenom (6.130) izračunava se da s obzirom na opasne napone koji se pojavljuju kod razmatrane TS 10/0,4 kV, otpornost R_u uzemljivača postrojenja 110/10 kV treba da iznosi

$$R_u \leqslant \frac{1}{0{,}3 \cdot 0{,}66} \frac{125}{1191} \left(1 - \frac{2}{0{,}66\,\pi} \arcsin \frac{78{,}15}{2.150}\right) = 0{,}71\ \Omega.$$

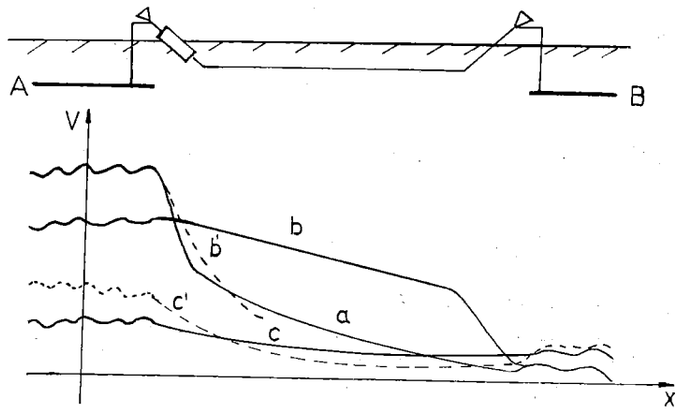
Pošto je otpornost rasprostiranja uzemljivača postrojenja 110/10 kV manja od dobijene vrednosti, kod TS 10/0,4 nije potrebno preduzimati nikakve dopunske mere za smanjivanje opasnih napona.

Galvansko odvajanje uzemljenja

Iznošenje potencijala iz postrojenja može se u principu sprečiti električnim odvajanjem uzemljivača postrojenja od objekata mreže srednjeg i niskog napona. Pomenuto odvajanje ostvaruje se ubacivanjem izolacionih umetaka u kablove, cevovode i druge metalne provodnike koji izlaze iz postrojenja. Kod kablovskih vodova mogu se koristiti izolacione spojnice ili se ovi mogu na drugom kraju izolovati od uzemljivača TS srednjeg napona koje napajaju.

Pomenuta rešenja dozvoljavaju da se uzemljivač TS visoki/srednji napon dimenzioniše isključivo prema naponu koraka i dodira. Ovo međutim ne mora da znači olakšanje uslova uzemljenja pomenutog postrojenja i susednih objekata, već naprotiv, a može da dovede i do drugih teškoća.

Uticaj razdvajanja uzemljivača na raspodelu potencijala oko objekata prikazan je kvalitativno na sl. 6.32. Na ordinati dijagrama prikazane su vrednosti potencijala na površini tla iznad kabla koji spaja uzemljivače *A* i *B*. Parametar *x* pokazuje udaljenje tačaka na razmatranom pravcu od sredine uzemljivača *A*.



Sl. 6.32

Sa *A* je označen uzemljivač TS visoki/srednji napon a sa *B* uzemljivač susedne, prijemne TS za koju se pretpostavlja da zbog uticaja svojih kablova i mreže niskog napona ima vrlo malu otpornost uzemljenja. Kabl je sa neizolovanim metalnim plaštom.

Kriva »a« prikazuje raspodelu potencijala kada je izolacioni umetak postavljen na početak kabla. Ovim se prouzrokuju, kao što se vidi, vrlo veliki gradienti potencijala kod prilaza postrojenju *A*. Postrojenje *A*, pošto se ne koristi uticaj kablova, ima znatan otpor rasprostiranja i dolazi na visoki potencijal u odnosu na referentnu zemlju.

Kriva »b« odnosi se na slučaj kada se kabl uvodi u postrojenje *B* izolovano od uzemljivača. Povećani gradijenti imaju se sada kod prilaza postrojenju *B*. Razmatranim rešenjem kod postrojenja *A* koristi se uticaj kabla kao uzemljivača ali ne i kao spone sa ostalim uzemljenim objektima.

Kriva »c« prikazuje raspodelu potencijala kada se plašt kabla ne prekida i vezuje se za uzemljivače na oba kraja.

Isprekidano izvučene krive daju sliku raspodele potencijala kod kabla sa izolovanim plaštom.

Kako se vidi, rešenja »c« odnosno »c'« daju najpovoljniju raspodelu potencijala. Ona, međutim, zahtevaju da se briga o održavanju bezopasnih napona dodira vodi na širokom prostoru van postrojenja *A*, kako bi se uočili eventualni opasni lokaliteti. Kod dobro projektovanih i izvedenih mreža i instalacija niskog napona ne treba u ovom pogledu očekivati posebne teškoće.

Prekidanje veze između uzemljivača postrojenja *A* i *B* preko plašta kabla, pored pogoršanja raspodele potencijala, ima i druge nepovoljne posledice. Ovim rešenjem redukcioni faktor kabla postaje praktično $r \approx 1$ usled čega se povećavaju uticaji koje kabl može da ima na telekomunikacione vodove kod zemljospojeva u mreži srednjeg napona (Odeljak 5.6) a takođe se otežavaju i uslovi uzemljenja kod pomenutih kvarova (Odeljak 6.6). Navedenim rešenjem povećava se, pored toga, nulta impedansa kabla o čemu treba voditi računa kod podešenja zemljospojne zaštite, ako se u mreži srednjeg napona primenjuje uzemljenje preko male impedanse.

Ubacivanje umetaka teško je konstruktivno izvesti kod pojedinih tipova kablova, kao što su, na primer, kablovi sa papirnom izolacijom. Pored toga, u urbanim i industrijskim područjima praktično je nemoguće efikasno električno odvojiti uzemljenja zbog postojanja različitih metalnih instalacija u tlu.

Razdvajanje uzemljenja TS visoki/srednji napon od objekata mreže srednjeg napona može da bude opravdano u slučaju kada se u mreži srednjeg i niskog napona nemaju dobri uslovi za uzemljenje, na primer usled toga što ne postoje dovoljno prostrana kablovska mreža, a ni dodatni uzemljivači kao što su armirano-betonski fundamenti zgrada i temeljni uzemljivači, vodovodna mreža i dr. Povezivanje uzemljenja u razmatranom slučaju ne dovodi do bitnog snižavanja nivoa potencijala, a proširuje mu oblast rasprostiranja.

6.6. DIMENZIONISANJE UZEMLJENJA POSTROJENJA PREMA KVAROVIMA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

6.6.1. STRUJE I NAPONI U SISTEMU UZEMLJENJA

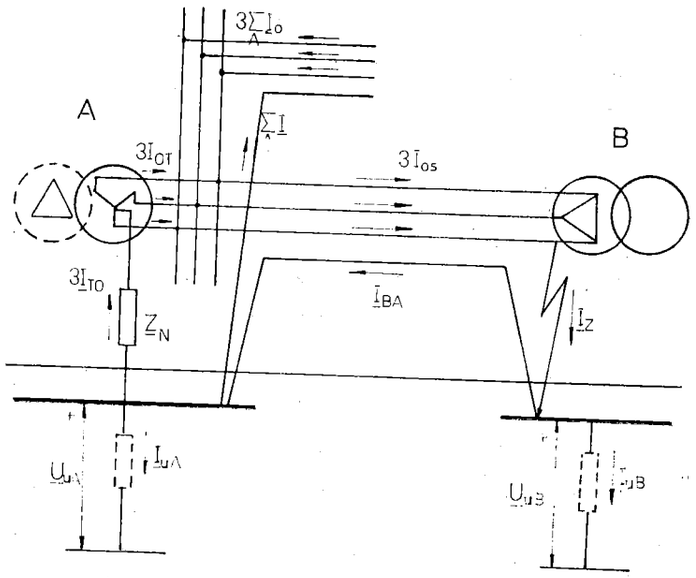
Opšta šema za analizu uslova uzemljenja kod zemljospojeva u distributivnoj mreži prikazana je na sl. 6.33.

Postrojenje *A* je izvorno za distributivnu mrežu, na primer transformatorska stanica visoki/srednji napon ili srednji/srednji napon. Postrojenje *B* koje se napaja iz *A* je transformatorska stanica srednji/srednji ili srednji/niski napon.

Jednostavnosti radi pretpostavljeno je da je namotaj transformatora u *A* na strani višeg napona vezan u trougao. Način obuhvatanja uticaja sprege namotaja u zvezdu pokazan je principijelno u tački 6.5.1.

Kao karakterističan, razmatra se jednofazni zemljospoj u postrojenju *B*. Pomenuti kvar merodavan je za ocenu uslova uzemljivanja oba postrojenja.

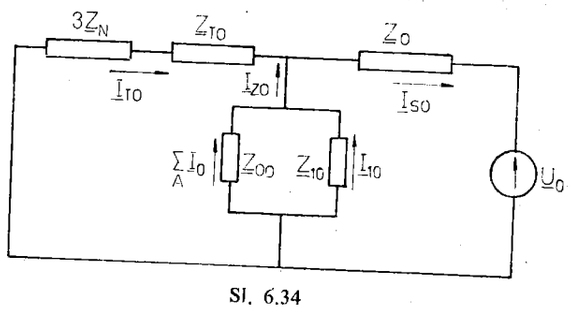
Povratnim provodnikom koji povezuje uzemljivače postrojenja A i B prikazan je metalni plašt odnosno zaštitni provodnik voda između postrojenja.



Sl. 6.33

Struja $\sum_A \underline{I}_0$ označava udeo ostalog dela mreže napajane iz TS-A u struji jednofaznog zemljospoja. Ako se pretpostavi da se razmatrana distributivna mreža napaja isključivo iz TS-A i da je uzemljenje neutralne tačke izvedeno upravo u ovom postrojenju, što je obično slučaj, struja $\sum_A \underline{I}_0$ određena je praktično nultim odvodnostima i kapacitetima vodova.

Proračun struja mreže prikazanih na sl. 6.33 može se izvesti prema šemi sa sl. 6.34.



Sl. 6.34

Iz šeme su izostavljene otpornosti uzemljenja postrojenja, radi jednostavnosti. One po pravilu ne utiču bitno na raspodelu struja.

Parametri u šemi imaju sledeće značenje

$\underline{Z}_{T0}$ — nulta impedansa napojnog transformatora

$\underline{Z}_{00}$ — rezultantna otočna nulta impedansa vodova ostalog dela distributivne mreže

$\underline{Z}_{10}, \underline{Z}_0$ — otočna i redna nulta impedansa voda između postrojenja A i B, respektivno.

Nulta komponenta napona na mestu kvara $\underline{U}_0$ zavisi, saglasno (1.20), od impedansi mreže za 0 i α redosled za mesto kvara i napona na mestu kvara u režimu pre kvara, U_r. Po pravilu je, s obzirom na tipične vrednosti impedansi mreže,

$$\underline{U}_0 \approx -\underline{U}_r. \tag{6.131}$$

Struja jednofaznog zemljospoja koja teče od pogođene faze ka uzemljenim delovima jednaka je (Tačka 1.1.1)

$$\underline{I}_z = 3\,\underline{I}_{s0}. \tag{6.132}$$

Struja kroz uzemljivač postrojenja A može se u skladu sa šemom na sl. 6.33 izračunati kao

$$\underline{I}_{uA} = -3\,\underline{I}_{T0} + \underline{I}_{BA} - \sum_A \underline{I}. \tag{6.133}$$

Poslednji član u (6.133) predstavlja zbir struja koje se odvode sa uzemljivača postrojenja A preko plašteva kablova i zaštitnih provodnika vodova vezanih za pomenuti uzemljivač. Navedeni uticaj kabla između postrojenja A i B obuhvaćen je strujom $\underline{I}_{BA}$.

Za struju $\underline{I}_{BA}$ se može pisati

$$\underline{I}_{BA} = (1 - \underline{r}_{AB})\,\underline{I}_z + \underline{I}_{uBA}, \tag{6.134}$$

gde prvi član potiče od uticaja magnetne sprege faznih provodnika i omotača (zaštitnog provodnika), a drugi, od potencijalne razlike u sistemu uzemljenja.

Takođe se ima

$$\sum_A \underline{I} = 3 \sum_A (1 - \underline{r})\,\underline{I}_0 + \sum_A \underline{I}_u, \tag{6.135}$$

sa istim značenjem komponenti struja.

Prema šemi na sl. 6.34 je

$$\underline{I}_{T0} = \underline{I}_{s0} - \sum_A \underline{I}_0 - \underline{I}_{10}. \tag{6.136}$$

S obzirom na (6.134) do (6.136) iz (6.133) se, posle sređivanja, dobija

$$\underline{I}_{uA} = -\underline{r}_{AB}\,\underline{I}_z + 3 \sum_A \underline{r}\,\underline{I}_0 + 3\,\underline{I}_{10} + \underline{I}_{uBA} - \sum_A \underline{I}_u. \tag{6.137}$$

Kada se uticaj plašteva i zaštitnih provodnika prikaže preko impedansi uzemljenja (tačka 6.5.1) iz (6.137) se dobija

$$\underline{I}_{uA} = \frac{-\underline{r}_{AB}\,\underline{I}_z + 3 \sum_A \underline{r}\,\underline{I}_0 + 3\,\underline{I}_{10} + \underline{I}_{uBA}}{1 + R_{uA} \cdot \sum_A \dfrac{1}{\underline{Z}}}. \tag{6.138}$$

Ekvivalentna impedansa uzemljenja postrojenja A može se izračunati kao

$$\underline{Z}_A=\left(\frac{1}{R_{uA}}+\sum_A\frac{1}{\underline{Z}}\right)^{-1}, \tag{6.139}$$

a napon na uzemljivaču

$$\underline{U}_{uA}=R_{uA}\underline{I}_{uA}. \tag{6.140}$$

Struja $\underline{I}_{uAB}$ jednaka je

$$\underline{I}_{uBA}=\frac{\underline{U}_{uB}-\underline{U}_{uA}}{\underline{Z}_{AB}}, \tag{6.141}$$

gde je sa $\underline{Z}_{AB}$ označena podužna impedansa plašta odnosno zaštitnog provodnika. Budući da su impedanse $\underline{Z}_{AB}$ znatne a i da se, kada je povratni provodnik u kontaktu sa zemljom, deo struje $\underline{I}_{uBA}$ odvodi u tlo i preko ovoga vraća postrojenju A, pomenuta se struja može obično zanemariti. Takođe je obično zanemarljiva i struja $3\underline{I}_{10}$.

Struja koju treba da odvede uzemljivač postrojenja B jednaka je prema šemi na sl. 6.33

$$\underline{I}_{uB}=\underline{I}_z-\underline{I}_{BA}-\sum_B\underline{I}_u. \tag{6.142}$$

Poslednji član u (6.142) obuhvata struje koje se sa posmatranog uzemljivača odvode preko vazdušnih vodova i kablova vezanih za uzemljivač. Pri tom je učinjena pretpostavka da se mesto kvara napaja samo preko voda koji polazi iz postrojenja A.

S obzirom na (6.134) iz (6.142) se dobija

$$\underline{I}_{uB}=\underline{r}_{AB}\underline{I}_z-\underline{I}_{uBA}-\sum_B\underline{I}_u. \tag{6.143}$$

Ako se uticaj vodova i kablova kao uzemljivača obuhvati preko impedansi uzemljenja, dobija se

$$\underline{I}_{uB}=\frac{\underline{r}_{AB}\underline{I}_z-\underline{I}_{uBA}}{1+R_{uB}\cdot\sum_B\frac{1}{\underline{Z}}}. \tag{6.144}$$

Ekvivalentna impedansa uzemljenja postrojenja B je

$$\underline{Z}_B=\left(\frac{1}{R_{uB}}+\sum_B\frac{1}{\underline{Z}}\right)^{-1}, \tag{6.145}$$

a napon na uzemljenju

$$\underline{U}_{uB}=R_{uB}\underline{I}_{uB}. \tag{6.146}$$

Kada je

$$\underline{Z}_A\ll\underline{Z}_B, \tag{6.147}$$

što je po pravilu slučaj, biće

$$\underline{U}_{uA}\ll\underline{U}_{uB}, \tag{6.148}$$

tako da će se vod AB u pogledu uticaja kao uzemljivač, ponašati kao ostali vodovi koji polaze iz postrojenja B. Za proračun struje $\underline{I}_{uB}$ može se tada primeniti formula

$$\underline{I}_{uB}=\frac{\underline{r}_{AB}\underline{I}_z}{1+R_{uB}\cdot\sum_B\frac{1}{\underline{Z}}}, \tag{6.149}$$

u kojoj se u sumi u imeniocu obuhvata i impedansa uzemljenja plašta (zaštitnog provodnika) voda AB. Na isti se način obuhvata uticaj voda AB i na impedansu $\underline{Z}_B$.

6.6.2. MREŽA SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM

Kod izolovane neutralne tačke je u šemi na sl. 6.34 $Z_N=\infty$, tako da se ima

$$\underline{I}_{s0}=\sum_A\underline{I}_0+\underline{I}_{10}. \tag{6.150}$$

Posle zamene $\underline{I}_{s0}$ prema (6.132) i (6.150) u (6.138) dobija se za struju uzemljivača postrojenja A

$$\underline{I}_{uA}=\frac{3\sum_A\underline{r}\,\underline{I}_0-\underline{r}_{AB}\,3\sum_A\underline{I}_0+(1-\underline{r}_{AB})\,3\,\underline{I}_{10}+\underline{I}_{uBA}}{1+R_{uA}\cdot\sum_A\frac{1}{\underline{Z}}} \tag{6.151}$$

Iz (6.151) zaključuje se da najveće vrednosti struja $\underline{I}_{uA}$ ima u slučaju kada su vodovi koji polaze iz postrojenja A pretežno kablovski sa niskim redukcionim faktorom, a vod AB vazdušni, ili obrnuto. U pomenutim okolnostima jedan od prva dva člana u brojiocu, koji u najvećoj meri određuju vrednost struje $\underline{I}_{uA}$, zanemarljivo je mali prema drugom. Može se ipak reći da i tada struja $\underline{I}_{uA}$ nema znatne vrednosti, tako da nije merodavna za dimenzionisanje uzemljenja postrojenja A, već su to kvarovi na višenaponskoj strani.

Kod homogenih mreža kod kojih vodovi imaju približno jednake redukcione faktore, struja $\underline{I}_{uA}$ jednaka je

$$\underline{I}_{uA}=\frac{(1-\underline{r}_{AB})\,3\,\underline{I}_{10}+\underline{I}_{uBA}}{1+R_{uA}\cdot\sum_A\frac{1}{\underline{Z}}} \tag{6.152}$$

i ima neznatne vrednosti.

Struja koju odvodi uzemljivač postrojenja B izračunava se primenom (6.144) odnosno (6.149).

Struja I_{uB} često je merodavna za dimenzionisanje uzemljivača postrojenja B. Ako je u pitanju TS srednji/srednji napon, pri izboru uzemljivača, razume se, treba uzeti u obzir i kvarove na niženaponskoj strani, na način opisan za postrojenje A. Izvođenje uzemljenja TS-srednji/niski napon dosta je specifično zbog opasnosti prenošenja opasnih napona sa uzemljivača u mrežu niskog napona i instalacije potrošača, tako da će biti razmatrano u posebnom odeljku.

Kod mreža kod kojih ne postoji zemljospojna zaštita ili signalizacija koja omogućuje brzo otkrivanje i isključivanje zemljospojeva, na primer u toku vremena kraćeg od 2 h, pri dimenzionisanju uzemljenja postrojenja treba računati i sa dvostrukim zemljospojevima, koji se odlikuju znatnim strujama (Tačka 1.2.1).

Pomenuti kvarovi moraju se imati u vidu kod dimenzionisanja uzemljenja TS srednji/niski napon kako se u mreži niskog napona ne bi pojavili opasni naponi, budući da je ovde verovatnoća opasnih dodira zbog velikog broja objekata mreže i njihove pristupačnosti znatna (Tačka 3.8.3).

Kod TS-srednji/srednji napon opasni naponi usled dvostrukih zemljospojeva ne prenose se neposredno u mrežu niskog napona i instalacije potrošača. Pošto su pomenute TS po pravilu neposednute, do električnog udara moglo bi da dođe samo ako u toku radova na otklanjanju jednofaznog zemljospoja u TS nastane drugi zemljospoj u ostalom delu mreže. Verovatnoća pomenutog sticaja okolnosti data je prvim članom izraza (3.196) i približno je upola manja od verovatnoće $P(B)$. Sama opasnost od električnog udara, ako razmatrani sticaj događaja ipak nastane, neuporedivo je manja nego kod TS-srednji/niski napon pošto u TS-srednji/srednji napon u eventualni kontakt sa povišenim naponom može da dođe ograničen broj ljudi. Remontne ekipe su pored toga, sastavljene od obučenih ljudi koji primenjuju propisima predviđene mere zaštite na radu.

6.6 3. KOMPENZOVANA MREŽA

Kod kompenzovanih mreža je

$$3Z_N \gg Z_{T0}. \tag{6.153}$$

Ako se zanemari Z_{T_0} i $\underline{Z}_0$ iz šeme na sl. 6.34 se dobija, kada se ima u vidu (6.132),

$$\underline{I}_z = -3\,\underline{U}_0\left(\frac{1}{3\,\underline{Z}_N}+\frac{1}{\underline{Z}_{00}}+\frac{1}{\underline{Z}_{10}}\right)$$

$$= \underline{I}_p + 3\sum_A \underline{I}_0 + 3\,\underline{I}_{10}. \tag{6.154}$$

Prvi član u (6.154) predstavlja struju koja protiče kroz kompenzacionu prigušnicu.

Kada se I_z prema (6.154) uvrsti u (6.138) izraz za struju $\underline{I}_{uA}$ postaje

$$\underline{I}_{uA} = \frac{-\underline{r}_{AB}\underline{I}_p - \underline{r}_{AB}\,3\sum_A \underline{I}_0 + 3\sum_A \underline{r}\,\underline{I}_0 + 3\,\underline{I}_{01}(1-\underline{r}_{AB}) + \underline{I}_{uBA}}{1+R_{uA}\cdot\sum_A \frac{1}{\underline{Z}}}. \tag{6.155}$$

U brojiocu izraza (6.155) preovlađuju po vrednosti prva tri člana. Kada su drugi i treći član bliski po vrednosti, što je slučaj kod homogenih mreža, pomenuti izraz se znatno uprošćava. Ako se pri tom zanemare i poslednja dva člana u brojiocu, dobija se

$$\underline{I}_{uA} = \frac{-\underline{r}_{AB}\underline{I}_p}{1+R_{uA}\cdot\sum_A \frac{1}{\underline{Z}}}. \tag{6.156}$$

Iz (6.155) i (6.156) se zaključuje da preko uzemljivača postrojenja A protiče znatan deo struje I_p. Ova je struja, kako je poznato, približno jednaka kapacitivnoj komponenti struje zemljospoja mreže i može imati osetne vrednosti kod prostranih kablovskih mreža. Pošto rad mreže sa zemljospojem često traje duže, uzemljivač postrojenja A treba da bude tako dimenzionisan da kod struja I_{uA} naponi dodira i koraka ne pređu trajno dozvoljene vrednosti.

Struja $\underline{I}_z$, koja prema (6.149) određuje struju uzemljivača postrojenja B, predstavlja preostalu, nekompenzovanu struju zemljospoja. Budući da je pomenuta struja reda vrednosti nekoliko procenata struje jednofaznog zemljospoja (Tačka 4.1.1), struja I_{uB} je obično znatno manja od I_{uA} i ne postavlja teške zahteve pred uzemljivač postrojenja.

I kod kompenzovanih mreža treba, kada nije obezbeđeno blagovremeno isključenje zemljospojeva, računati sa pojavom dvostrukih kvarova.

6.6.4. MREŽE UZEMLJENE PREKO MALE IMPEDANSE

Kada je mreža uzemljena preko male impedanse ima se

$$3Z_N \ll Z_{00},\ Z_{10}. \tag{6.157}$$

Takođe je po pravilu i

$$3Z_N \gg Z_{T0},\ Z_0. \tag{6.158}$$

Ako se ima u vidu (6.157) i (6.158), iz šeme na sl. 6.34 se dobija

$$\underline{I}_z = -\frac{3\,\underline{U}_0}{3\,\underline{Z}_N} \approx \frac{\underline{U}_r}{\underline{Z}_N}.$$

Tačniji proračun $\underline{I}_z$ uz uvažavanje padova napona u napojnoj mreži i vodu AB prikazan je u 6.1.2.

Struja $\underline{I}_z$ je, s obzirom na (6.157) znatno veća od ostalih struja u (6.138), tako da se može približno pisati

$$\underline{I}_{uA} = \frac{-\underline{r}_{AB}\underline{I}_z}{1+R_{uA}\cdot\sum_A \frac{1}{\underline{Z}}}. \tag{6.159}$$

Struja I_{uA} mogla bi da bude merodavna za izbor uzemljivača postrojenja A ako je mreža višeg napona neuzemljena.

Za proračun uzemljivača postrojenja B i kod mreža uzemljenih preko male impedanse merodavna je po pravilu struja I_{uB}, koja se računa prema (6.144) ili (6.149).

6.7. UZEMLJENJE TS-SREDNJI/NISKI NAPON

Specifičnost TS-srednji/niski napon sastoji se u tome što je neutralna tačka transformatora na niskom naponu po pravilu direktno uzemljena a ujedno, preko četvrtog, neutralnog voda u neposrednoj električnoj vezi sa aparatima u niskonaponskoj mreži. Ako je u mreži niskog napona primenjeno nulovanje ili zajedničko

zaštitno uzemljenje, neutralna tačka transformatora je metalno povezana i sa kućištima aparata i objektima niskonaponske mreže uopšte. Iz navedenih razloga biće u pojedinim slučajevima potrebno da se radno uzemljenje mreže niskog napona izdvoji od osnovnog, zaštitnog uzemljenja TS, kako bi se sprečilo prenošenje potencijala uzemljenja TS pri kvarovima u srednjenaponskoj mreži u mrežu niskog napona. U slučajevima kada se izvodi združeno uzemljenje u TS, korišćenjem jednog uzemljivača i kao zaštitnog za srednjenaponski i niskonaponski deo TS i kao radnog uzemljenja mreže niskog napona, moraće se preduzeti posebne mere da se ne dozvoli pojava opasnih napona u niskonaponskoj mreži. U pomenutim uslovima moraju se takođe preduzeti mere koje će smanjiti verovatnoću dvostrukih zemljospojeva u srednjenaponskoj mreži, koja zavisi od načina uzemljenja njene neutralne tačke, primenjene zaštite, signalizacije i manipulacione tehnike, obima mreže i dr.

Na urbanizovanim ili industrijalizovanim područjima je, zbog postojanja mnogih metalnih delova u tlu nemoguće efikasno izdvojiti radno i zaštitno uzemljenje. U ovakvim će okolnostima često upravo uslovi uzemljenja TS-srednji/niski napon odlučujuće uticati na koncepcije u mreži srednjeg napona u pogledu načina uzemljenja neutralne tačke i zemljospojne zaštite.

6.7.1. IZOLOVANA ILI KOMPENZOVANA MREŽA

Ako u izolovanim ili kompenzovanim mrežama nije obezbeđeno brzo isključivanje jednofaznih zemljospojeva, pri projektovanju uzemljenja TS-srednji/niski napon treba računati sa pojavom dvostrukog zemljospoja.

Brzo otklanjanje jednofaznih zemljospojeva postiže se primenom zemljospojne zaštite, koja se može podesiti tako da deluje u vremenu kraćem od 1 s. Kako je, međutim, pokazano u 3.8.4., verovatnoća uspostavljanja dvostrukih zemljospojeva praktično ne postoji i kada se kvarovi otklanjaju i u periodu do 2 h posle nastanka, što se može obezbediti dobrom organizacijom signalizacije i službe remonta, posebno u gradskim mrežama.

Jednofazni zemljospojevi se ne otklanjaju brzo

U slučaju kada u mreži srednjeg napona nije obezbeđeno brzo odstranjivanje jednofaznih zemljospojeva a ova je toliko prostrana da se mogu očekivati dvostruki zemljospojevi, radno uzemljenje mreže niskog napona treba odvojiti od zaštitnog uzemljenja transformatorske stanice.

Zaštitno uzemljenje TS najekonomičnije je izvesti kao zajedničko za oba naponska nivoa, sa jednom ili dve konture i cevima na uglovima spoljne konture. Unutrašnju konturu može da predstavlja temeljni uzemljivač zgrade TS odnosno sama njegova armirano-betonska konstrukcija.

Osnovne karakteristične veličine za dimenzionisanje zaštitnog uzemljivača su, u razmatranim uslovima, napon dodira i koraka kod TS.

Naponi dodira i koraka treba svakako da zadovolje odgovarajuće propise kod jednofaznih zemljospojeva u TS. Tako se izbegavaju naponi koji bi mogli da dovedu do opasnih električnih udara pri približavanju TS i dodiru njenog kućišta i drugih metalnih delova, kako sa spoljne, tako i sa unutarnje strane.

U skladu sa razmatranjima u 6.1 i 6.7.3 napon dodira kod TS može se izračunati kao

$$U_d = \frac{1}{s_d} E_d = \frac{c_d}{s_d} \varrho I_u, \tag{6.160}$$

a napona koraka

$$U_k = \frac{1}{s_k} E_k = \frac{c_k}{s_k} \varrho I_u. \tag{6.161}$$

Karakteristični sačinioci c_d i c_k za pravougaone i prstenaste uzemljivače mogu se odrediti prema dijagramima datim u 6.7.3.

Struja I_u kroz uzemljivače TS izračunava se prema (6.149).

Kod TS kod kojih do dodira može doći spolja, na primer doticanjem vrata ili metalnih zidova kućišta, napon U_d ne sme da bude veći od dozvoljenog napona dodira van postrojenja. Treba uočiti da se kod stubnih TS sa drvenim stubom ne mogu sa tla dohvatiti uzemljeni delovi, tako da se ovde uzemljivač dimenzioniše samo prema naponu koraka. Inače je, po pravilu, za uzemljivače TS kritičniji uslov (6.160).

Kod razmatranih postrojenja bilo bi svakako poželjno obezbediti dovoljno niske napone dodira i koraka i u slučaju dvostrukog, a ne samo jednostrukog zemljospoja. Ovim se osigurava puna bezbednost ekipa koje rade na otklanjanju zemljospoja u TS, koje su sa izvesnom malom verovatnoćom izložene opasnosti od nastanka drugog zemljospoja u mreži, kako je pomenuto u 6.6.2. Pošto obično nije moguće odrediti niske vrednosti napona dodira i koraka u posmatranim uslovima uzemljivačem, potrebna bezbednost može se postići primenom opreme i pravila za rad pod naponom, polaganjem izolacionih pokrivki unutar TS ili nasipanjem odnosno asfaltiranjem tla oko TS. Ovakve je mere potrebno preduzimati naročito kod prostranih mreža srednjeg napona.

Zaštitno uzemljenje TS treba da ima dovoljno malu ekvivalentnu impedansu da napon koji se javi na zaštitnom uzemljivaču pri jednofaznom zemljospoju u TS, ne dovede do proboja odnosno preskoka sa uzemljenih delova na kolo niskog napona koje se, ako su zaštitno i radno uzemljenje efikasno odvojeni, nalazi približno na potencijalu referentne zemlje.

Pomenuti uslov biće ispunjen ako je

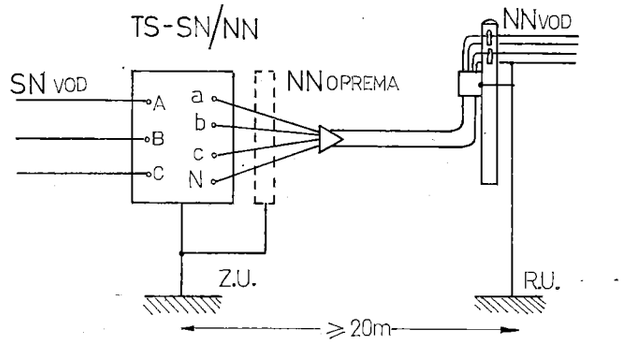
$$U_u \leqslant \varkappa U_{i\sim}, \tag{6.162}$$

gde je sa $U_{i\sim}$ označen naizmenični ispitni napon opreme niskog napona a sa $\varkappa<1$ koeficijent sigurnosti. Obično se usvaja $\varkappa=0{,}6$.

Kriterijum (6.162) nije po pravilu teško ispuniti kada su zadovoljeni kriterijumi u pogledu napona dodira i koraka.

Uslov (6.162) nije najčešće moguće održati u slučaju nastanka dvostrukog zemljospoja sa jednim kvarom u TS. Ovakav kvar će stoga obično dovesti do preskoka na stranu niskog napona, na primer probojem izolacije između namotaja transformatora. Visoke vrednosti napona koji će u posmatranim okolnostima preći u mrežu niskog napona prouzrokovaće preskok sa provodnika na uzemljene delove u mreži ili kod kućnih priključaka i izazvati delovanje postojeće zaštite u mreži bez neposrednog ugrožavanja potrošača.

Potrošači na niskom naponu bili bi, naprotiv, izloženi stvarnoj opasnosti od prodiranja napona nedovoljno velikih da dovedu do kvarova u mreži niskog napona a ipak dosta većih od dozvoljenih napona dodira. Kriterijumom (6.162) se upravo obezbeđuje da ovakvi naponi ne prodru u mrežu niskog napona.



Sl. 6.35

Na sl. 6.35 prikazan je šematski mogući način izvođenja uzemljenja kod slobodno stojeće TS sa vazdušnom mrežom niskog napona i kablovskim izlazom. Radno uzemljenje izvodi se kod jednog od prvih stubova mreže tako da bude na rastojanju bar 2 D od ivice zaštitnog uzemljivača TS, ako se sa D označi dijagonala ovog uzemljivača. Zadovoljavajuće razdvajanje uzemljivača postiže se obično sa rastojanjima reda 20 m.

Izlazni kabl treba da bude bez metalnog plašta. Ovo se odnosi i na sve druge kablove niskog napona koji polaze iz TS. Takođe se mogu koristiti i kablovi sa metalnim plaštom koji su izolovani od tla neprovodnim omotačem.

Rad sa razdvojenim uzemljenjima može se ostvariti samo kod prigradskih i seoskih mreža. Pošto je pomenuto rešenje nemoguće koristiti u gradskim i industrijskim mrežama, ovde u srednjenaponskoj mreži treba primeniti mere za blagovremeno otklanjanje jednofaznih zemljospojeva, ugradnjom odgovarajuće zaštite i signalizacije ili prelaskom na uzemljenje preko male impedanse. Ovakve mere potrebne su prvenstveno kod srednjenaponskih mreža veće prostranosti.

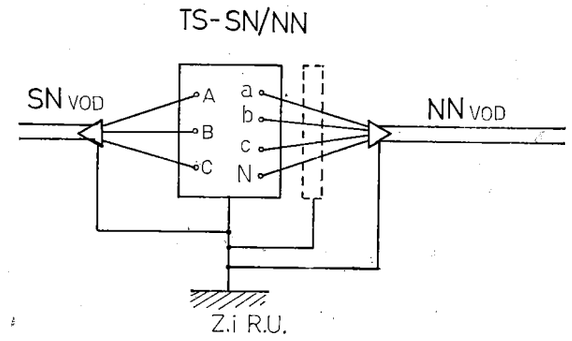
Jednofazni zemljospojevi se brzo otklanjaju

Kada se jednofazni zemljospojevi u mreži srednjeg napona otklanjaju dovoljno brzo, pri izboru uzemljenja TS-srednji/niski napon ne treba voditi računa o dvostrukim zemljospojevima.

Uzemljenje TS može se izvesti, ako za to postoje uslovi, sa razdvojenim radnim i zaštitnim uzemljivačem. Tada se zaštitno uzemljenje bira i izvodi na isti način kao u prethodnom slučaju, s tim što sada nisu potrebne dodatne mere zaštite unutar i van TS.

Kako je ranije pomenuto, u gradskim uslovima nije moguće sigurno izdvojiti uzemljenja TS, tako da je najbolje izvesti zajedničko, objedinjeno uzemljenje. Način izvođenja pomenutog uzemljenja prikazan je principijelno na sl. 6.36. Kod slobodno stojećih TS polaže se samo jedan zajednički uzemljivač koji služi i za zaštitno i za

radno uzemljenje TS. Uzemljivač se može izvesti na isti način kao uzemljivač zaštitnog uzemljenja TS za slučaj razdvojenih uzemljenja. Na uzemljivač se vezuju metalni plaštevi svih kablova kako na strani visokog, tako i na strani niskog napona.



Sl. 6.36

Kod TS koje se nalaze u stambenim, javnim i industrijskim objektima, kao objedinjeni uzemljivač TS koristi se uzemljivač objekta koji se povezuje sa vodovodnim i drugim metalnim instalacijama u zgradi preko zajedničkih sabirnica za uzemljenje.

Objedinjeni uzemljivač treba izabrati tako da ovaj, pored kriterijuma (6.160) i (6.161) koji se odnose na TS, zadovolji i uslove bezbednosti u pogledu napona dodira na objektima mreže niskog napona i u instalacijama potrošača.

Pomenuti napon može se izračunati primenom relacije

$$U_d = \frac{1}{s_d} U_u f_d. \tag{6.163}$$

Sačinioci s_d i f_d odnose se na mesto dodira u mreži niskog napona (Tačka 6.5.4). Napon na uzemljenju TS jednak je, saglasno (6.145), (6.146) i (6.149)

$$U_u = R_u I_u = Z_B r I_z. \tag{6.164}$$

Ako je mreža niskog napona štićena nulovanjem ili zajedničkim zaštitnim uzemljenjem [25], napon U_d pojaviće se na kućištima svih štićenih objekata.

Kada je u mreži niskog napona primenjena zaštita pojedinačnim zaštitnim uzemljenjem [25], U_d prema (6.163) može se imati samo kod objekata koji su u vezi sa kablovima niskog napona sa metalnim plaštom, što se odnosi eventualno na stubove javnog osvetljenja i kablovske ormane. Ako je mreža niskog napona vazdušna ili ima kablove bez metalnog plašta, u mreži ne postoji opasnost od dodira.

U slučaju korišćenja zaštitnog strujnog diferencijalnog prekidača [25], neutralni provodnik takođe ne dolazi u kontakt sa kućištima aparata, tako da važi isto što je rečeno za individualno zaštitno uzemljenje.

Kako se vidi, kod nulovanih mreža i mreža sa zajedničkim zaštitnim uzemljenjem imaju se nepovoljniji uslovi u pogledu napona U_d nego kod drugih vrsta zaštite od opasnih napona. Da se, međutim, na osnovu izvedene analize ne bi dobila po-

grešna slika o valjanosti pojedinih zaštita, treba imati u vidu da se pojedinačnim zaštitnim uzemljenjem obično ne mogu postići dovoljno niske impedanse za efikasno delovanje zaštite od kvarova na niskom naponu u instalacijama većih snaga, kakve se imaju u iole urbanizovanim područjima. Primena strujnih prekidača u pomenutim uslovima zahteva povećana investiciona ulaganja i posebnu kontrolu i održavanje, tako da se takođe, ne može smatrati podesnom kao opšta zaštitna mera [97]. S druge strane, uslovi u pogledu napona U_d u nulovanim mrežama lako se postižu, tako da ne predstavljaju ograničenje za primenu ove zaštitne mere.

Kriterijum

$$U_d \leqslant U_{dd}$$

biće zadovoljen ako je, saglasno (6.163) i (6.164)

$$Z_B \leqslant \frac{f_d U_{dd}}{s_d r I_z}. \tag{6.165}$$

U najkritičnijim uslovima, za $f_d \approx 1$ i $s_d \approx 1$ dobija se

$$Z_B \leqslant \frac{U_{dd}}{r I_z}. \tag{6.166}$$

Za napon U_{dd} treba uvrstiti vrednosti dozvoljene van postrojenja.

Kriterijum (6.165) lako se zadovoljava s obzirom na relativno niske vrednosti struje kvara u razmatranim mrežama i, naročito, male vrednosti impedanse Z_B. Vrednost Z_B posebno smanjuje veza uzemljivača sa nultim provodnikom koji, budući da se ne prekida, objedinjuje sva radna uzemljenja mreže niskog napona. Na Z_B u znatnoj meri, kako je pokazano u 6.6.1, utiču i kablovi sa metalnim omotačem. Uslov (6.165) može se, ako je napojni srednjonaponski vod čisto kablovski, ostvariti čak i bez polaganja posebnog uzemljivača kod TS, nezavisno od vrste mreže NN.

Neka, na primer, mreža iz koje se napaja TS-srednji/niski napon ima struju jednofaznog zemljospoja $I_z = 100$ A, a zemljospoj se otklanja za najduže 2 h. Napojni kabl je sa neizolovanim metalnim plaštom i ima kod pomenute vrednosti struje kvara redukcioni faktor $r \approx 0{,}5$. TS je izvedena sa objedinjenim zaštitnim i radnim uzemljenjem.

Za $U_{dd} = 65$ V, koliko se prema sl. 6.6 dozvoljava kod dodira van postrojenja i trajnijeg kvara, iz (6.166) se izračunava

$$Z_B \leqslant \frac{65}{0{,}5 \cdot 100} = 1{,}3\ \Omega.$$

Kako se vidi iz Tabele 6.2, kod umerenih specifičnih otpornosti tla otpornost uzemljenja napojnog kabla manja je od potrebne vrednosti Z_B.

Primenom sistema nulovanja i objedinjenih uzemljivača, prirodno se povezuju svi metalni delovi urbanizovanog područja u jednu celinu što dovodi do opšteg izjednačavanja potencijala na celoj teritoriji i olakšava uslove uzemljenja, kako TS-srednji/niski napon tako i drugih, ranije razmatranih gradskih TS.

Ako uzemljenje TS-srednji/niski napon zadovoljava uslov (6.166), biće sigurno ispunjeni i propisi u pogledu napona dodira i koraka kod same TS, tako da ovde pomenute napone ne treba računati.

Uslov (6.165) trebalo bi postaviti i kod mreža sa individualnim zaštitnim uzemljenjem ili strujnim prekidačima, kako bi se obezbedilo da se osoblje pri radovima na mreži niskog napona, kada dolazi u kontakt sa neutralnim provodnikom, ne bi izložilo opasnom naponu. Budući da se radi o stručnom osoblju, u uslovu (6.165) mogle bi se u razmatranom slučaju za napon U_{dd} uvrstiti vrednosti dozvoljene unutar postrojenja.

6.7.2. MREŽA UZEMLJENA PREKO MALE IMPEDANSE

Pošto kod mreža srednjeg napona sa neutralnom tačkom uzemljenom preko male impedanse ne postoji opasnost od dvostrukih zemljospojeva, to i ovde treba težiti, zbog jednostavnosti i ekonomičnosti, primeni objedinjenog uzemljenja.

Osnovni kriterijum koji treba da ispuni uzemljenje i u ovom slučaju predstavlja relacija (6.165). Pomenuti uslov sada je, međutim, teže ispuniti nego ranije, zbog većih vrednosti struja jednofaznih zemljospojeva. Pravilnim izborom struje I_z relacija (6.165) moći će se ispuniti bez većih teškoća u gradskim i industrijskim mrežama u kojima se imaju niske vrednosti impedansi Z_B zbog dobrog uzemljenja objekata mreže niskog napona i instalacija potrošača.

Razmotrimo, radi primera, uslove za izvođenje objedinjenog uzemljenja kada se TS napaja iz mreže 10 kV preko kabla IPO 13 3×95 mm^2, ako je struja jednofaznog zemljospoja u mreži 10 kV podešena na 300 A.

Prema sl. 5.36 može se za kabl u razmatranom slučaju usvojiti $r \approx 0{,}2$. Za $U_{dd} = 65$ V, koliko bi odgovaralo trajanju kvara od 1 s (sl. 6.6), iz (6.166) se izračunava

$$Z_B \leqslant \frac{65}{0{,}2 \cdot 300} = 1{,}08\ \Omega.$$

Nađena granična vrednost Z_B može se isto kao i u prethodnom primeru, postići samim napojnim kablom.

Kod prigradskih i seoskih TS povoljan uticaj postojećih uzemljivača objekata mreže niskog napona manje dolazi do izražaja zbog manjeg broja i slabijeg kvaliteta ovih uzemljivača, a u nekim slučajevima, kada nije izvedeno nulovanje, i sasvim izostaje.

Ako se TS napajaju preko vazdušnog voda ili kabla sa izolovanim metalnim plaštom takođe nestaje ili se umanjuje povoljan uticaj mreže visokog napona. Pošto sam uzemljivač TS ne može po pravilu, zbog malih dimenzija, da zadovolji uslove (6.165) odnosno (6.166), zaštitno i radno uzemljenje moraće se često razdvojiti kako bi se sprečilo prenošenje potencijala (6.164) u mrežu niskog napona. Način izvođenja uzemljenja u posmatranom slučaju isti je kao za izolovane i kompenzovane mreže sa neblagovremenim otklanjanjem zemljospoja, prikazan na sl. 6.35, a isti su i kriterijumi za dimenzionisanje uzemljivača.

Zbog znatnih struja jednofaznih zemljospojeva kod uzemljenja preko male impedanse, u nekim se slučajevima neće moći ispuniti uslovi u pogledu napona dodira i koraka kod TS. Do ovakvih okolnosti može doći kada su i napojni vod i vodovi mreže niskog napona vazdušni, a prvi je izveden bez zaštitnog provodnika, tako da uzemljivač sam odvodi svu struju zemljospoja. U navedenom slučaju uzemljivač treba dimenzionisati prema uslovu (6.162) a u TS i oko nje preduzeti dopunske mere zaštite pomenute u Tački 6.7.1 za mreže kod kojih se ne može obezbediti brzo otklanjanje jednofaznih zemljospojeva.

6.7.3. UZEMLJIVAČI TS-SREDNJI/NISKI NAPON

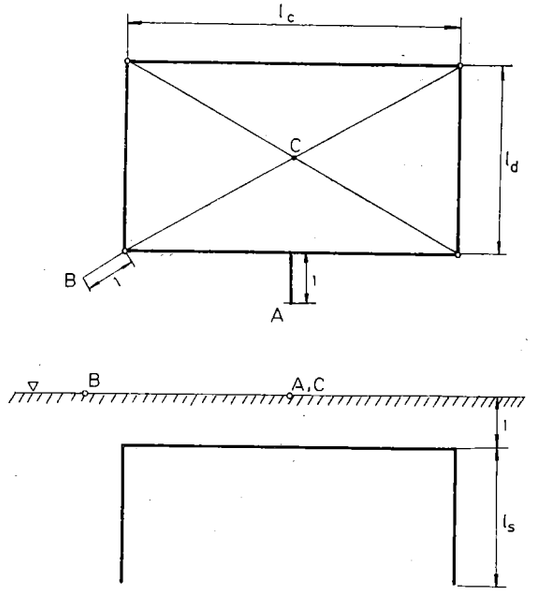
Iako se kriterijumi u pogledu uzemljenja TS-srednji/niski napon vrlo često, naročito ako se ove napajaju kablom sa neizolovanim metalnim plaštom, mogu zadovoljiti čak i bez polaganja posebnog uzemljivača kod TS, kako je pokazano u 6.7.2, ovi su uzemljivači ipak potrebni radi održavanja povoljne raspodele potencijala oko TS.

Uzemljivači TS-srednji/niski napon izvode se obično u obliku jedne ili dve pravougaone konture na različitim dubinama, sa vertikalnim elementima na uglovima spoljne konture. Kombinacija kružnih prstenova takođe se koristi, prvenstveno kod TS na stubu a i kod stubova vazdušnih vodova.

Na pomenute, specifične oblike uzemljivača ne mogu se uvek sa dovoljno tačnosti primeniti opšte relacije iz Tačke 6.5.2, koje važe za mrežaste uzemljivače i pravougaone uzemljivače bez vertikalnih elemenata. Karakteristike tipskih uzemljivača TS srednji/visoki napon analizirane su primenom računara u [98, 99, 73]. Pojedini za praksu najinteresantniji rezultati pomenutih proračuna daju se u narednim izlaganjima.

Pravougaoni uzemljivači

Na računaru su analizirane karakteristike uzemljivača koji se sastoje iz jedne pravougaone konture sa vertikalnim elementima na uglovima (sl. 6.37). Horizontalni elementi su Fe/Zn trake $1\times$ (30×4) mm, a vertikalni, cevi ⌀ 70 mm, dužine 3 m.



Sl. 6.37

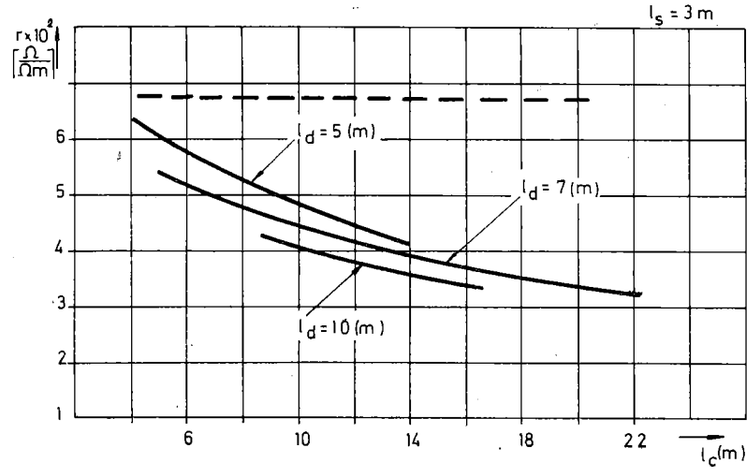
Računata je otpornost rasprostiranja uzemljivača, potencijalna razlika dodira za stajna mesta *A*, *B* i *C* i potencijalna razlika koraka na mestu *B*. Stajno mesto *C* nalazi se na preseku dijagonala konture, a mesto *B* na produženju dijagonale.

Na sl. 6.38 pokazana je zavisnost koeficijenta otpornosti rasprostiranja uzemljivača

$$r=\frac{R_u}{\rho} \tag{6.167}$$

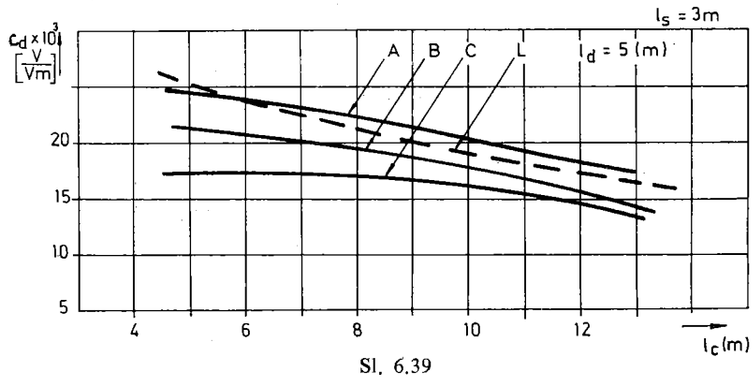
od dužina ivičnih elemenata. Pomenuti parametar predstavlja opštu karakteristiku uzemljivača budući da zavisi isključivo od njegove geometrije [98]. Isprekidano izvučena prava daje vrednosti parametra r po približnoj formuli

$$r=\frac{1}{n}\,\frac{1}{2\pi l_s}\ln\frac{4l_s}{d}, \tag{6.168}$$



Sl. 6.38

koja bi strogo važila za uzemljivač od n vertikalnih elemenata, ukopanih na dovoljno velikim uzajamnim rastojanjima da efekat ekraniranja bude zanemarljiv



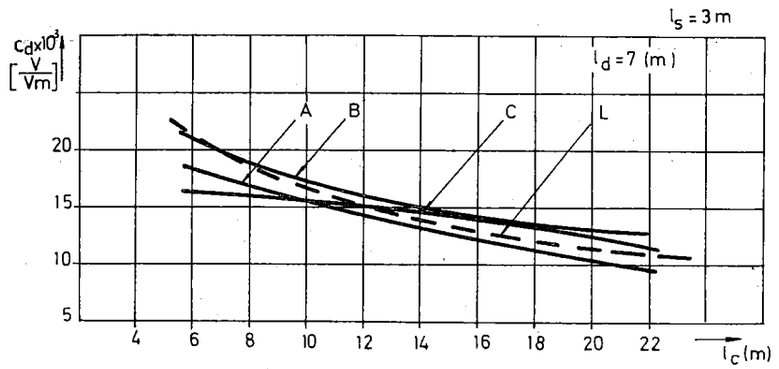
Sl. 6.39

sa gornjim krajevima neposredno ispod površine tla. Sa l_s označena je dužina, a sa d, prečnik poprečnog preseka vertikalnih elemenata.

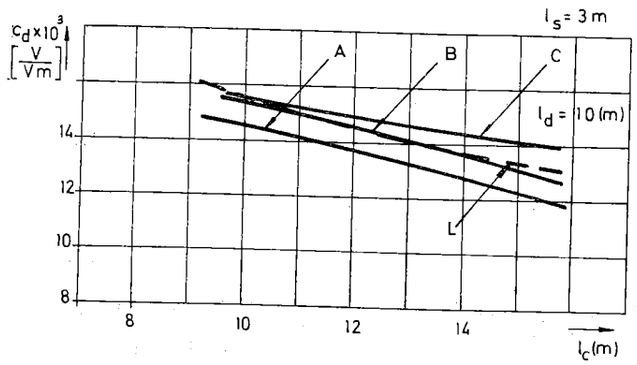
Krive na sl. 6.39 do 6.42 pokazuju koeficijente dodira za sva tri karakteristična stajna mesta, definisane kao [98]

$$c_d = \frac{E_d}{\rho I_u}. \tag{6.169}$$

Isprekidano izvučena kriva dobija se kada se E_d računa prema (6.113) sa k_d=0,8 pri čemu se u L obuhvata i dužina vertikalnih elemenata.



Sl. 6.40

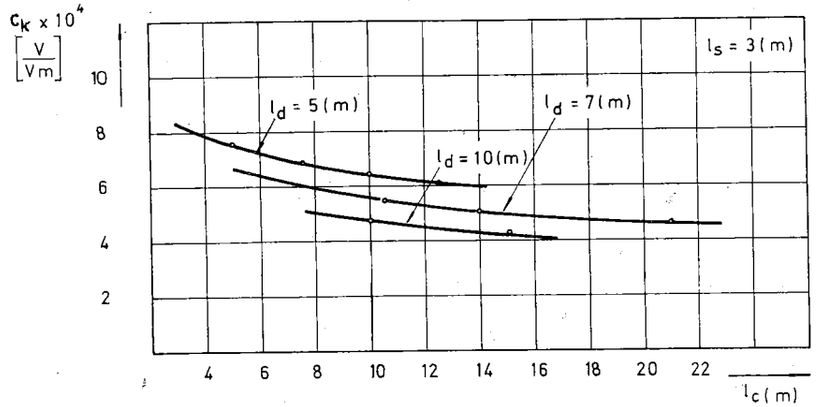


Sl. 6.41

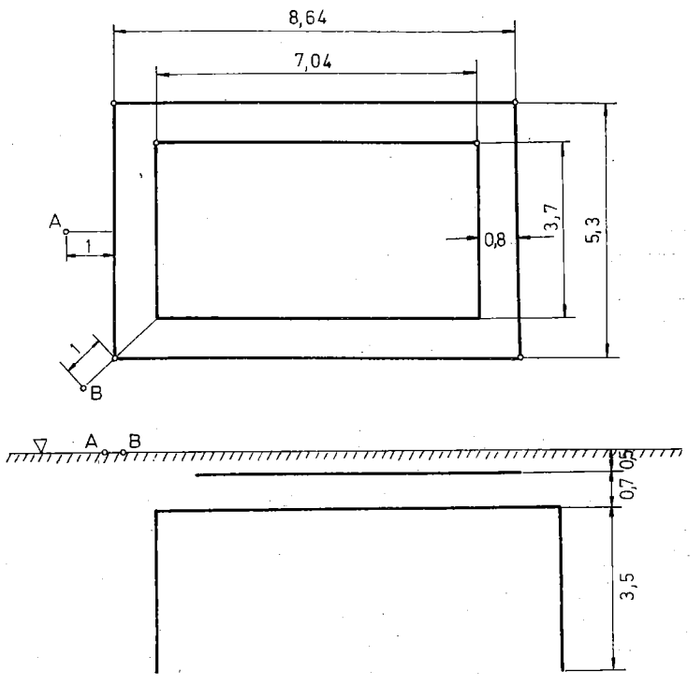
Na sl. 6.42 prikazane su vrednosti koeficijenta koraka [98]

$$c_k = \frac{E_k}{\rho I_u}. \tag{6.170}$$

Formula (6.114) daje inače približno pet puta veće vrednosti od navedenih tako da se ne može primeniti kod razmatranih uzemljivača.



Sl. 6.42

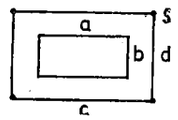
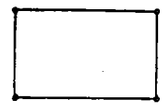
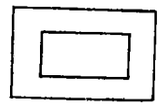


Sl. 6.43

Da bi se ispitao uticaj oblika uzemljivača na proučavane karakteristične veličine, analiziran je dvokonturni uzemljivač jedne TS-srednji/niski napon, prikazan na sl. 6.43, u potpunoj i uprošćenim konfiguracijama [98].

Rezultati proračuna prikazani su u Tabeli 6.5. Konfiguracija 2 dobijena je iz potpunog uzemljivača prema sl. 6.43 izostavljanjem unutarnje konture, a konfiguracija 3, izostavljanjem vertikalnih elemenata. Sa 1 označena je potpuna konfiguracija.

TABELA 6.5

Uzemljenje	$\frac{Ru}{\rho}$ 1/m	$\frac{Uu}{\rho I_u}$ 1/m	$\frac{Ed_A}{\rho I_u}$ 1/m	$\frac{Ed_B}{\rho I_u}$ 1/m	i_a (%)	i_b (%)	i_c (%)	i_d (%)	i_s (%)
1 	0,04578	0,04578	0,01622	0,0117	0,986	0,948	1,438	1,396	2,814
2 	0,04828	0,04828	0,0170	0,01854	—	—	2,016	1,90	3,194
3 	0,0560	0,0560	0,01644	0,0250	1,490	1,518	2,366	2,492	—

Sa i su u tabeli označene struje koje se odvode po jednom metru različitih elemenata uzemljivača. Indeksi a, b odnose se na dužu i kraću stranu unutarnje, a indeksi c i d na odgovarajuće strane spoljne konture, respektivno. Sa s su označeni vertikalni elementi.

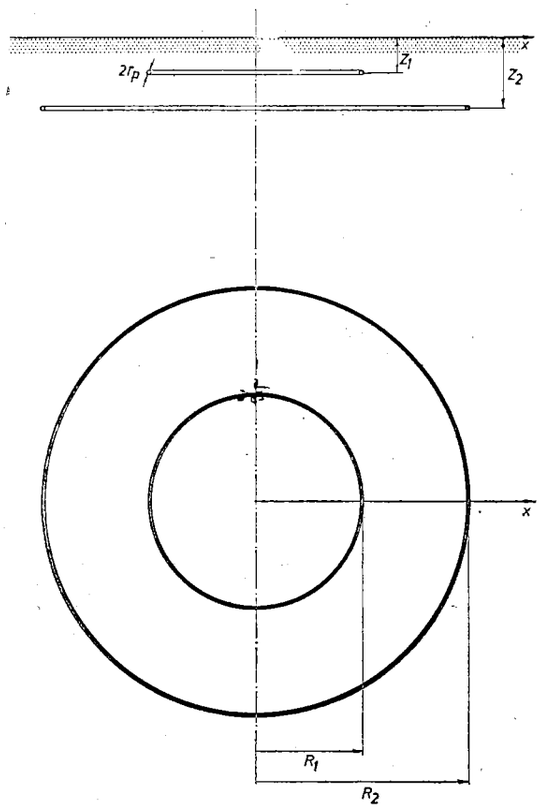
Uzemljivač 2 ima otpornost rasprostiranja za svega reda 5% veću od otpornosti potpune konfiguracije 1. Kod uzemljivača 3 ovo povišenje iznosi 22%. E_{dA} uzemljivača 3 je za 1% a uzemljivača 2, za 5% veće nego kod potpune konfiguracije. Varijante 2 i 3, posebno ova poslednja, znatno su nepovoljnije od 1 sa stanovišta potencijalne razlike dodira na uglovima uzemljivača, E_{dB}. Kod uzemljivača 2 ova je potencijalna razlika veća za 58% a kod 3, kod koga izostaje pozitivan efekat sondi, za svih 114%.

U odvođenju struje, kako se vidi, najintenzivnije učestvuju sonde i, u nešto manjoj meri, trake spoljnje horizontalne konture. Unutarnja kontura doprinosi ublažavanju potencijalnih razlika na površini tla iznad i na ivicama uzemljivača.

Izvedeni proračuni pokazuju da se uzemljivač sa jednom konturom može smatrati jednako dobrim kao i dvokonturni uzemljivač u pogledu otpornosti rasprostiranja. Dijagram na sl. 6.38 može se, prema tome, koristiti i kod proračuna otpornosti dvokonturnog uzemljivača. U praktičnim procenama može se inače smatrati da su potencijalne razlike dodira približno za 50% manje kod dvokonturnih uzemljivača nego kod jednokonturnih istih dimenzija elemenata.

Prstenasti uzemljivači

Proračun karakteristika različitih kombinacija koaksijalnih prstenastih uzemljivača izveden je na digitalnom računaru u [99].

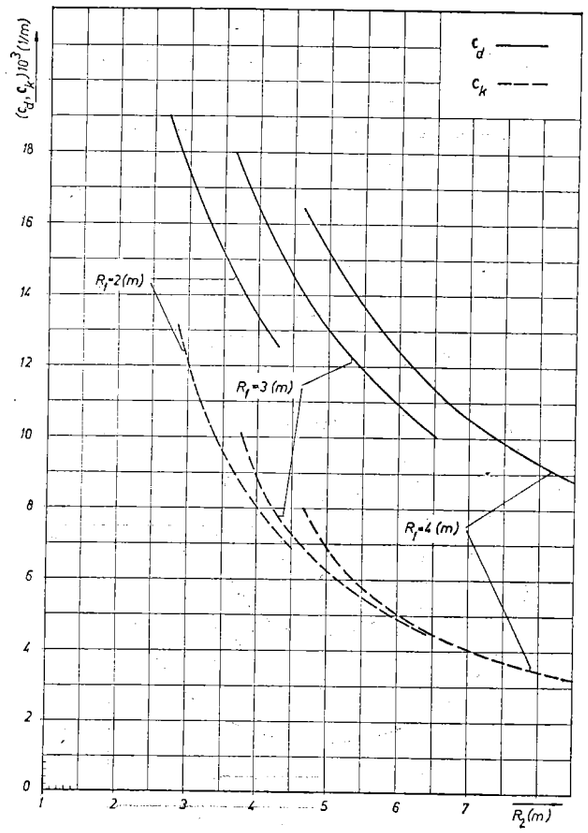


Sl. 6.44

Analizirani su dvokonturni uzemljivači sa dubinama ukopavanja Z_1=0,5 m i Z_2=1 m i različitim poluprečnicima unutarnjeg i spoljnjeg prstena, R_1 i R_2, respektivno (sl. 6.44).

Za svaki razmatrani par vrednosti R_1 i R_2 računata je raspodela potencijala na površini tla duž radijalnog pravca i određene su potencijalne razlike dodira i koraka i otpornost rasprostiranja. Učinjena je pretpostavka da su elementi uzemljivača trake $1\times$ (30×4) mm. Pomenute trake zamenjene su kružnim provodnicima ekvivalentnog obima.

Dobijene vrednosti za koeficijente dodira i koraka za različito R_1 i R_2 prikazane su u obliku dijagrama na sl. 6.45.

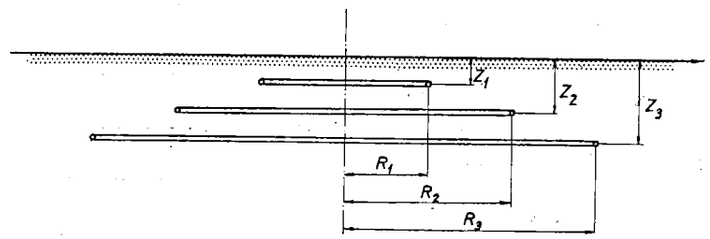


Sl. 6.45

Podaci o koeficijentu otpornosti rasprostiranja pokazani su, takođe grafički, nasl. 6.48, zajedno sa istim podacima za trokonturni uzemljivač.

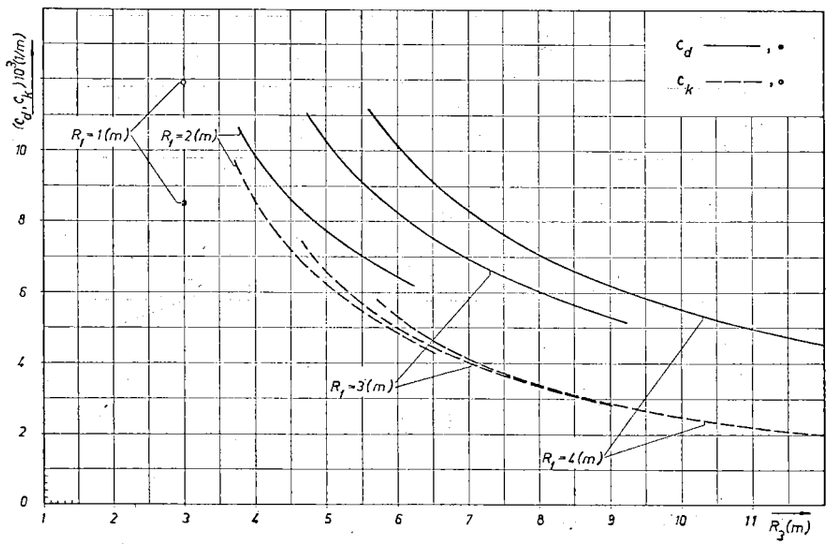
Na računaru je analiziran i trokonturni prstenasti uzemljivač sa konturama položenim u tri nivoa na dubinama

$$Z_1=0{,}333 \text{ m},\ Z_2=0{,}666 \text{ m i } Z_3=1 \text{ m}.$$



Sl. 6.46

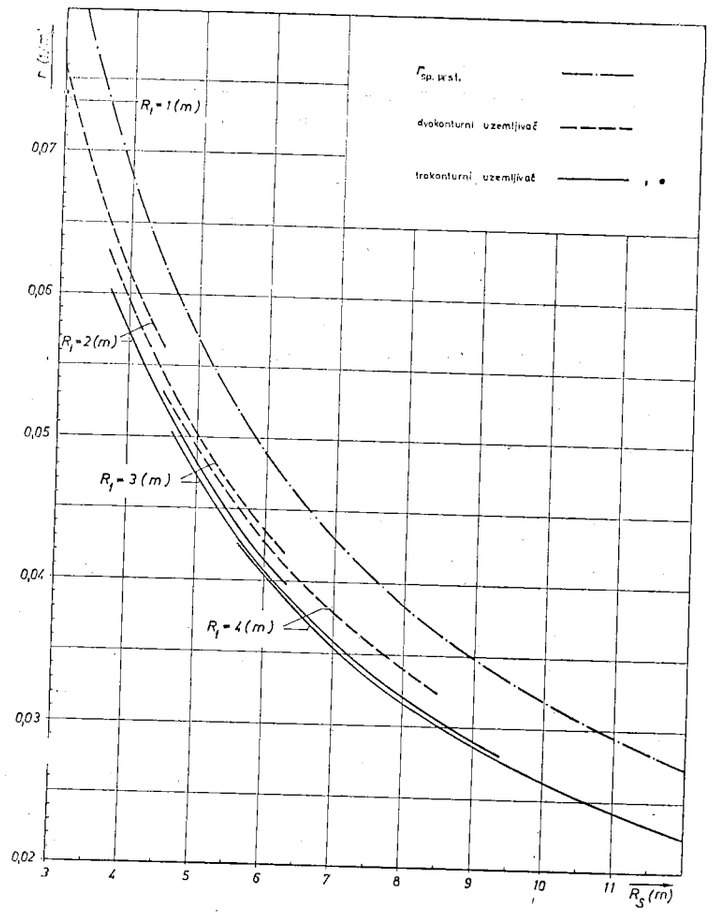
Proračuni su izvedeni za različite vrednosti poluprečnika unutrašnjeg i spoljnjeg prstena, R_1 i R_3, pri čemu je usvojeno $R_2=\frac{1}{2}(R_1+R_3)$.



Sl. 6.47

Rezultati proračuna koeficijenata dodira i koraka za trokonturni uzemljivač prikazani su u vidu dijagrama na sl. 6.47.

Podaci o koeficijentima otpornosti rasprostiranja dvo- i trokonturne konfiguracije prikazani su na sl. 6.48. Ovde je sa R_s označen poluprečnik spoljne konture. Na slici su date i vrednosti koje bi razmatrani koeficijent imao kada bi postojao samo spoljni prsten.



Sl. 6.48

Eksperimentalni podaci

U okviru studije zaštite od opasnih napona [97], na području Beograda su merene karakteristične veličine sistema uzemljenja kod više TS-10/0,4 kV. Eksperimentalne TS birane su tako da se obuhvate osnovni tipovi TS prema vrsti gradnje i lokaciji, kao i prema vrsti mreža 10 i 0,4 kV. Sve TS su bile izvedene sa odvojenim zaštitnim i radnim uzemljenjem.

Rezultati merenja prikazani su u Tabeli 6.6. U prvoj koloni navedeno je područje grada i oznaka TS. Ostali simboli imaju sledeće značenje:

R_r — rezultantna otpornost radnog uzemljenja mreže 0,4 kV, merena bez odvajanja od neutralnog provodnika,

Z — ekvivalentna impedansa zaštitnog uzemljenja koja obuhvata uticaj kablova,

ρ — specifična otpornost tla,

E_{d1}, E_{k1} — najveće izmerene potencijalne razlike dodira i koraka po jedinici struje koja se preko zaštitnog uzemljenja odvodi u tlo,

e_{zr} — procentualni iznos napona na radnom uzemljenju prouzrokovan odvođenjem struje sa zaštitnog uzemljenja,

K, M, V — oznaka za kablovsku, mešovitu i vazdušnu mrežu.

U eksperimentima se, tamo gde je pristup bio moguć, zamkastim strujnim transformatorom, bez prekidanja veza uzemljenja, merio deo struje koji se odvodi preko plašteva kablova. Ovakva su merenja obavljena kod svih TS na području Karaburme i Šumica i na TS-360 na N. Beogradu. Izmerene vrednosti struja iznosile su 70 do 90% ukupne struje odvođenja postignute u eksperimentima. Sve navedene TS imaju čisto kablovsku ili mešovitu niskonaponsku mrežu sa nekoliko kablovskih odvoda sa provodnim omotačima (tipa IPO ili PO) tako da preko istih, zajedno sa zaštitnim uzemljenjima susednih TS formiraju zajednički zaštitni uzemljivač za TS na širem području mreže. U prilog ovakvom zaključku govore i rezultati merenja otpora zaštitnih uzemljenja TS. Iz Tabele 6.6 se može zapaziti da sve TS na jednom užem području imaju približno iste vrednosti otpornosti zaštitnog uzemljenja iako su im konfiguracije uzemljivača različite i nejednakih mogućnosti odvođenja. Otpori TS na području Karaburme kreću se, kao što se vidi, u opsegu 0,35 do 0,5 Ω, na području Šumica između 0,15 i 0,20 Ω. Otpori rasprostiranja TS-311, 360, 380 i 378 u stambenom bloku 28 na Novom Beogradu imaju vrednosti između 0,41 i 0,65 Ω.

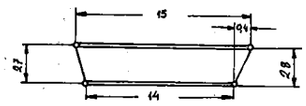
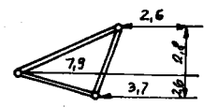
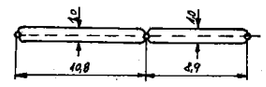
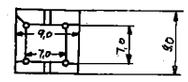
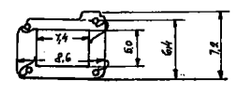
Povoljan uticaj kablova može se i kvantitativno oceniti ako se izmerene vrednosti otpornosti uporede sa vrednostima otpornosti koje bi se postigle samo uzemljivačima položenim kod TS. Prema proračunima na računaru [97, 98] koeficijent otpornosti rasprostiranja trougaonog uzemljivača TS-815 imao bi vrednost $r \approx 0{,}07$ Ω/Ωm, tako da bi za izmereno srednje ρ kod TS, prema Tabeli 6.6, otpor rasprostiranja uzemljivača bio

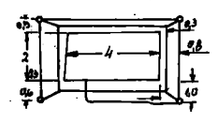
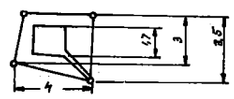
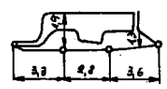
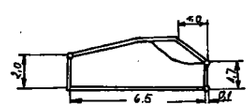
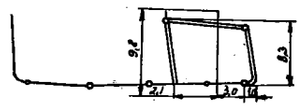
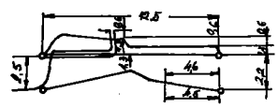
$$R_u = r\,\rho \approx 0{,}07 \cdot 29 \approx 2\ \Omega.$$

Odnos stvarne otpornosti (impedanse) zaštitnog uzemljenja i otpornosti položenog zaštitnog uzemljivača je, prema tome, $\frac{0{,}35}{2} \approx 0{,}17$ iz čega proizilazi da se približno samo oko 20% struje kvara odvodi kroz uzemljivač TS, a ostalih 80%, znači najveći deo, preko plašteva VN i NN kablova, bilo neposredno bilo preko uzemljivača susednih TS.

Do istih se zaključaka sličnim proračunom dolazi i kod ostalih TS u kablovskoj mreži. Otpornosti rasprostiranja njihovih uzemljivača mogu se približno proceniti pomoću dijagrama za pravougaone uzemljivače, date u odeljku I.2, sličnih osnovnih dimenzija.

TABELA 6.6

TS		R_r	Z	ρ (Ωm)	E_{d1} (V/A)	e_{zr} (%)	E_{k1} (V/A)	NN mreža	VN mreža	Skica zaštitnog uzemljivača
Karaburma	830	0,55	0,35	21	0,05	80	0,036	M	K	
	105	0,25	0,50	30	0,075	60÷90	0,10	M	K	
	815	0,26	0,35	29	0,05	≈0	0,03	K	K	
Šumice	196	0,28	0,16	27	0,04	85	0,005	K	K	
	719	0,29	0,15	21	0,06	50÷55	0,007	M	K	
	801	0,46	0,20	15,2	0,04	80	0,04	K	K	

Zemun	322	0,3	1,9	37,5	0,575	20÷30	0,039	V	V	
Novi Beograd	321	10	4,95	63	2,5	20	2	V	K	
	360	0,4	0,5	165	0,03	90	0,026	K	K	
	311	0,7	0,65	128	0,39	70	0,05	K	K	
	380	0,4	0,41	220	0,24	69	0,012	K	K	
	378	0,5	0,45	71	0,28	83	0,03	K	K	

Veće otpornosti rasprostiranja zaštitnog uzemljivača imaju stubna TS-321 sa vazdušnom visokonaponskom i niskonaponskom mrežom i limena TS-Z-322 sa kablovskim visokonaponskim dovodom i vazdušnom niskonaponskom mrežom (sa kratkim kablovskim izlazima do prvih stubova).

Otpornost rasprostiranja uzemljivača TS-321 moze se proceniti na osnovu dijagrama za simetrične četvorougaone uzemljivače na sl. 6.38. Sa dijagrama se za

$$l_c \approx l_d \approx 4 \text{ m}$$

očitava $r \approx 0{,}7\ \Omega/\Omega$ m tako da se sa srednjim specifičnim otporom tla prema Tabeli 6.6 dobija

$$R_z = r\,\varrho \approx 0{,}07 \cdot 63 = 4{,}4\ \Omega.$$

Dobijena vrednost otpornosti rasprostiranja dobro se poklapa sa izmerenom.

Rezultati merenja u kolonama 4 i 6 pokazuju da su kod većine TS sa kablovskom ili mešovitom mrežom potencijalne razlike dodira i koraka vrlo niske, tako da se ni pri strujama odvođenja reda 600 A, koje su oko 30 puta veće od eksperimentalnih, ne bi kod TS pojavile potencijalne razlike veće od 65 V.

Izuzetno se kod TS-311, TS-380 i TS-378 na Novom Beogradu javljaju nešto povećane potencijalne razlike dodira koje bi mogle da prevaziđu kritične vrednosti od reda 60 V već pri strujama odvođenja većim od 200 A, sa kojim bi trebalo sigurno računati u slučaju rezistantnog uzemljenja mreže 10 kV preko malog otpora. Ovde, međutim, treba imati u vidu da će se potencijalne razlike dodira znatno smanjiti posle povezivanja radnog i zaštitnog uzemljenja TS i to praktično za isti procenat za koji će se smanjiti i ekvivalentna otpornost (impedansa) uzemljenja TS. Budući da će se usled primene nulovanja u uzemljivač TS posredstvom nultih provodnika niskonaponskih vodova uključiti pored ostalih i uzemljivači kod potrošača i vodovodna instalacija, pomenuto smanjenje otpora i karakterističnih potencijalnih razlika kod TS biće osetno.

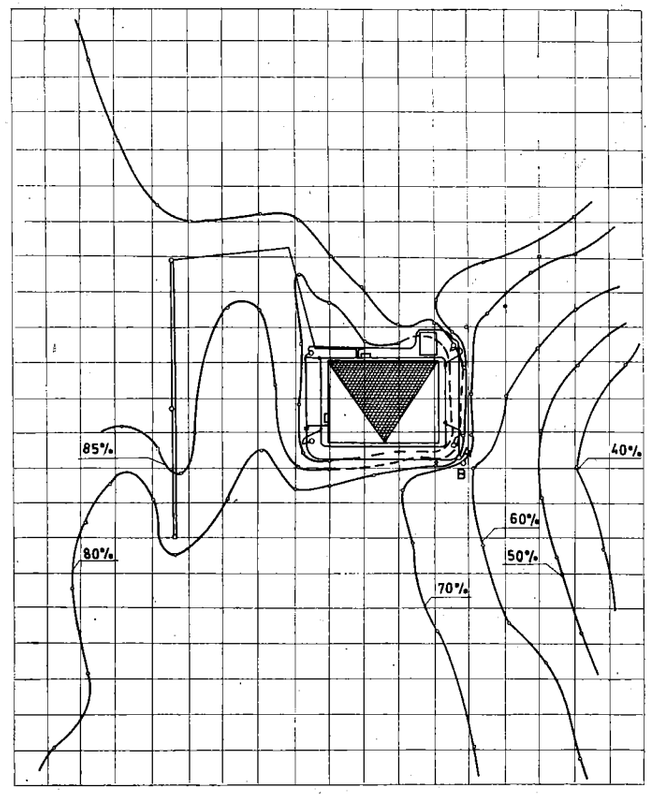
Poređenjem rezultata merenja u četvrtoj i šestoj koloni tabele dolazi se do zaključka da su u svim slučajevima (osim kod TS-105) konstatovane potencijalne razlike dodira veće od potencijalnih razlika koraka.

Vrlo visoke potencijalne razlike dodira i koraka javljaju se kod stubne TS-321 sa vazdušnom niskonaponskom mrežom. One su posledica velike vrednosti otpornosti rasprostiranja, malog površinskog gabarita i nesimetrije konfiguracije zaštitnog uzemljivača (Tabela 6.6). Raspodela potencijala oko pomenute TS može se smatrati opasnom već pri strujama odvođenja reda 30—40 A, ako su ove trajnije.

Unekoliko povoljnije su prilike kod limene TS-Z-322 u vazdušnoj niskonaponskoj i visokonaponskoj mreži. Ovde se opasni potencijali dostižu tek pri trajnijim strujama odvođenja reda 100 A.

Rezultati iz kolone 5 tabele pokazuju da kod većine TS sa kablovskim ili mešovitim niskonaponskim mrežama nije postignuto efikasno odvajanje radnog od zaštitnog uzemljenja. Kod 7 od 9 pomenutih TS na radnom se uzemljenju pod uticajem zaštitnog javljaju potencijali reda $60 \div 100\%$ potencijala zaštitnog uzemljenja.

Na sl. 6.49 prikazana je eksperimentalno utvrđena raspodela potencijala na tlu kod TS-801. Tačkama *A* i *B* označena su mesta sa najvećim potencijalnim razlikama koraka. Kako se vidi, na radnom uzemljenju 0,4 kV iako je ovo odvojeno od zaštitnog uzemljenja TS, javljaju se potencijali reda 85% potencijala na zaštitnom uzemljenju.



TS- 801, ŠUMICE

Sl. 6.49

6.8. UZEMLJENJE STUBOVA VAZDUŠNIH VODOVA

Kod armirano-betonskih ili metalnih stubova mogu se pri nastanku zemljospoja pojaviti opasni naponi dodira i koraka.

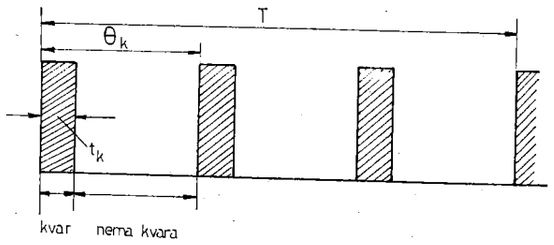
U analizi opasnosti od električnog udara treba, međutim, voditi računa o stvarnoj verovatnoći jednovremenosti opasnog približavanja i kvara, koja zavisi kako od dužine trajanja i broja zemljospojeva, tako i od mesta postavljanja stubova. Pomenuta analiza je naročito važna kada se ima u vidu da je kod uzemljenja mreže preko male impedanse teško obezbediti bezopasne napone dodira i koraka kada je vod bez zaštitnog provodnika.

Kod mreža uzemljenih preko male impedanse uzemljenje stubova treba da zadovolji i u pogledu otpornosti rasprostiranja.

Pomenute otpornosti treba da budu dovoljno male da obezbede vrednosti struje zemljospojeva koje će sigurno dovesti do reagovanja zemljospojne zaštite.

6.8.1. VEROVATNOĆA STICAJA USLOVA U POGLEDU OPASNIH NAPONA

Nastanak zemljospojeva na jednom stubu može se razmatrati kao niz događaja prikazan na sl. 6.50.



Sl. 6.50

Na slici je sa t_k označeno vreme trajanja kvarova a sa θ_k dužina ciklusa kvarova. Navedeni parametri predstavljaju prosečne vrednosti ustanovljene u toku posmatranja, tako da je dijagram događaja cikličan.

Ako sa T označimo period u toku koga se analiziraju uslovi u pogledu opasnih napona, a sa λ broj zemljospojeva na posmatranom stubu za vreme T, biće, očigledno

$$\theta_k = \frac{T}{\lambda}. \tag{6.171}$$

Parametar λ može se izračunati prema relaciji

$$\lambda = \lambda_1 \frac{l}{100} \frac{T}{8760} \frac{1}{n} \tag{6.172}$$

gde je

λ_1 — verovatni broj jednofaznih zemljospojeva na stubovima na 100 km dužine vodova u toku jedne godine (1/km god),
l — dužina vodova sa čeličnim i armirano-betonskim stubovima (km),
T — vremenski period za koji se izvodi analiza (h),
n — broj stubova na dužini l.

Parametar λ_1 određuje se obradom statističkih podataka o kvarovima u mreži.

Ako se sa a označi prosečna dužina raspona, može se pisati

$$l = (n-1)\, a,$$

iz čega sledi

$$n = \frac{l+a}{a} \approx \frac{l}{a}. \tag{6.173}$$

Tako se, s obzirom na (6.171) i (6.172), dobija

$$\theta_k = \frac{8760}{\lambda_1 \dfrac{a}{100}} h. \tag{6.174}$$

Verovatnoća da će na stubu biti zemljospoj određena je odnosom vremena trajanja kvara i vremena trajanja ciklusa kvarova

$$P(k) = \frac{t_k}{\theta_k}. \tag{6.175}$$

U skladu sa (6.174), razmatrana verovatnoća može se izračunati kao

$$P(k) = \lambda_1 \frac{a}{100} \frac{t_k}{8760}. \tag{6.176}$$

U (6.176) t_k treba uvrstiti u h, a ostale veličine u istim jedinicama kao u prethodnim izrazima.

Parametar t_k uslovljen je načinom eliminacije zemljospojeva koji se primenjuje u mreži.

Učestanost zemljospoja na stubovima jednaka je

$$f_k = \frac{1}{\theta_k} = \frac{\lambda_1 \dfrac{a}{100}}{8760} 1/h. \tag{6.177}$$

Nalaženje ljudi ili domaćih životinja u opasnoj zoni oko stubova u pogledu napona koraka i dodira takođe je slučajan događaj, koji se može analizirati po istoj šemi kao kvarovi na stubu.

Verovatnoća da će se neko nalaziti u opasnoj zoni kod stuba biće, analogno (6.176),

$$P(p) = \frac{t_p}{\theta_p}. \tag{6.178}$$

U (6.178) je sa θ_p označeno prosečno vreme trajanja jednog ciklusa približavanja a sa t_p prosečno vreme zadržavanja u opasnoj zoni kod svakog približavanja.

Učestanost opasnih približavanja kod stuba jednaka je

$$f_p = \frac{1}{\theta_p}. \tag{6.179}$$

Parametri t_p i θ_p zavise od mesta postavljanja stuba i mogu se odrediti statističkom obradom podataka dobijenih posmatranjem u dovoljno dugom periodu.

Ovakva proučavanja nisu, međutim, do sada vršena tako da se pomenuti parametri mogu samo grubo proceniti.

Verovatnoća koincidencije kvara i približavanja kod stuba, iznosi

$$P=P(k)\ P(p) \tag{6.180}$$

Verovatna učestanost sticaja razmatranih okolnosti može se proceniti kao [56]

$$f=f_p\ P(k)+f_k\ P(p). \tag{6.181}$$

S obzirom na (6.176) do (6.180), formuli (6.181) može se dati oblik

$$f=\frac{\lambda_1 \dfrac{a}{100}}{8760}\ \frac{t_k+t_p}{\theta_p}\ 1/h. \tag{6.182}$$

Broj razmatranih koincidencija u periodu posmatranja T iznosiće

$$N=fT=\lambda_1 \frac{a}{100}\ \frac{t_k+t_p}{\theta_p}\ \frac{T}{8760}. \tag{6.183}$$

U (6.182) i (6.183) vremena t_k, t_p i θ_p treba izraziti u istim jedinicama a vreme T u časovima.

Prosečno trajanje svake opasne situacije može se izračunati iz relacije

$$t=\frac{PT}{N}. \tag{6.184}$$

Izraz u brojiocu predstavlja ukupno trajanje opasne situacije u toku perioda posmatranja T.

Kada se u (6.184) uvrsti P prema (6.180), (6.176) i (6.178) i N prema (6.183), dobija se, posle sređivanja

$$t=\frac{t_k\,t_p}{t_k+t_p}. \tag{6.185}$$

Periodičnost nastanka kritičnih okolnosti jednaka je, saglasno (6.182),

$$\theta=\frac{1}{f}=\frac{8760}{\lambda_1 \dfrac{a}{100}}\ \frac{\theta_p}{t_k+t_p}\ h \tag{6.186}$$

odnosno

$$\theta=\frac{100}{\lambda_1\, a}\ \frac{\theta_p}{t_k+t_p}\ \text{god.}$$

Izvedene relacije mogu poslužiti za procenu verovatnoće opasnih okolnosti u karakterističnim slučajevima. Radi dobijanja orijentacione slike o mogućem iznosu razmatranih parametara, analiziraće se mogućnosti koincidencije kod stubova u

naseljenim mestima i kraj kupališta i kamping prostora, kod kojih je najveća verovatnoća opasnih približavanja.

Usvojimo vrednosti $\lambda_1=100$ 1/km, god. i $a=0{,}2$ km. Pretpostavićemo da kod stuba u naseljenom mestu ciklus približavanja traje prosečno $\theta_p=10$ min sa zadržavanjem $t_p=0{,}5$ min. U posmatranom je slučaju, znači, saglasno (6.178)

$$P(p)=\frac{0{,}5}{10}=0{,}05.$$

Učinićemo pretpostavku da je u mreži primenjena zemljospojna zaštita koja zemljospojeve isključuje sa $t_k=1$ s. Tada je, u skladu sa (6.176), verovatnoća da se na stubu ima zemljospoj jednaka

$$P(k)=100\ \frac{0{,}2}{100}\ \frac{1}{3600\cdot 8760}=6{,}34\cdot 10^{-9}.$$

Na osnovu (6.180) i (6.185) izračunava se

$$P=0{,}05\cdot 6{,}34\cdot 10^{-9}=3{,}17\cdot 10^{-10},$$

$$t=\frac{30\cdot 1}{30+1}=0{,}968\ s.$$

Prema (6.182), učestanost koincidencije izražena preko broja pomenutih okolnosti u godini iznosiće

$$f=\frac{100}{8760}\ \frac{0{,}2}{100}\ \frac{1+30}{600}\ 8760=0{,}0103\ \ (1/\text{god.}),$$

a periodičnost

$$\theta=\frac{1}{0{,}0103}=96{,}8\ \ \text{god.}$$

Proračuni svih karakterističnih pokazatelja opasnosti za razmatrani stub izvedeni su i za slučajeve $t_k=2$ h i $t_k=24$ h koji se mogu imati kada u mreži nije primenjena zemljospojna zaštita. Rezultati svih proračuna prikazani su u tabeli 6.7. Stub u naseljenom mestu označen je simbolom A.

Za stub kod kupališta pretpostavićemo da se u toku cele sezone kupanja, 9 h dnevno, svakog dana, neko nalazi u opasnoj zoni. Period posmatranja T je sezona kupanja.

Ako se uzme da ova sezona traje 5 meseci, dobiće se

$$T=5\cdot 30\cdot 24=3600\ \text{h}.$$

Verovatnoća opasnog približavanja u toku T će biti

$$P_{(p)}=\frac{9}{24}=0{,}375.$$

Ako je t_k=1 s, vreme trajanja opasnih okolnosti je, saglasno (6.185),

$$t=\frac{1\cdot 9\cdot 3600}{1+9\cdot 3600}\approx 1\ s.$$

Pri tom je broj opasnih okolnosti u sezoni, prema (6.183),

$$N=100\,\frac{0{,}2}{100}\,\frac{\dfrac{1}{3600}+9}{24}\,\frac{3600}{8760}=0{,}0308.$$

Pošto je N brojno jednako učestanosti po sezoni, može se pisati

$$\theta=\frac{1}{0{,}0308}=32{,}44 \text{ sezona}.$$

Ako se pretpostavi da van sezone kupanja ne dolazi do opasnog približavanja, može se smatrati da se dobijeni rezultati odnose ujedno i na godinu, tj. da do opasnih uslova dolazi 0,0308 puta godišnje, odnosno svake 32,44 godine.

Analiza opasnih uslova za razmatrani stub izvedena je i za t_k=2 h i t_k=24 h. Dobijeni rezultati prikazani su takođe u Tabeli 6.7 pod simbolom B, kojim je označen stub na kupalištu.

Najjasnijim pokazateljem opasnosti od sticaja kvara i približavanja kod stubova može se smatrati periodičnost θ. Na vreme θ, kako se vidi iz (6.186) i (6.187), utiče, pored intenziteta kvarova λ_1, odnos dužine trajanja zemljospoja i trajanja približavanja prema periodičnosti približavanja. Kada je učestanost približavanja velika odnosno θ_p kratko, što se može smatrati karakterističnim za stubove u naseljenim mestima u prometnim ulicama, periodičnost nastanka opasnih uslova jako zavisi od brzine otklanjanja kvara. Kako se vidi iz Tabele 6.7, opasni uslovi kod

TABELA 6.7

Stub	Slučaj br.	t_k	$P_{(k)}$	$P_{(p)}$	P	t	f 1/god.	Θ
A	1	1 s	$6{,}34\cdot10^{-9}$	0,05	$3{,}17\cdot10^{-10}$	1 s	0,0103	96,8 god.
	2	2 h	$4{,}56\cdot10^{-5}$	0,05	$2{,}28\cdot10^{-6}$	29,9 s	2,41	4,98 mes.
	3	24 h	$5{,}48\cdot10^{-4}$	0,05	$2{,}74\cdot10^{-5}$	30 s	28,81	12,5 dana
B	1	1 s	$6{,}34\cdot10^{-9}$	0,375	$2{,}37\cdot10^{-9}$	1 s	0,0308	32,44 god.
	2	2 h	$4{,}56\cdot10^{-5}$	0,375	$1{,}71\cdot10^{-5}$	1,64 h	0,0376	26,54 god.
	3	24 h	$5{,}48\cdot10^{-4}$	0,375	$2{,}17\cdot10^{-4}$	6,54 h	0,113	8,85 god.

stubova u naseljenim mestima nastaju vrlo retko kada postoji zemljospojna zaštita. U posmatranom slučaju uzemljenje stubova je dovoljno dimenzionisati prema potrebama zaštite i nije potrebno primenjivati nikakve posebne mere zaštite od opasnih napona oblikovanjem potencijala, asfaltiranjem tla i na drugi način. Izvedeni zaključak naročito je značajan za mreže uzemljene preko male impedanse gde se obično teško postižu bezopasni naponi kod stuba, zbog velikih struja jednofaznih zemljospojeva.

Kada se u mreži ne koristi zemljospojna zaštita, što može da bude slučaj kod izolovanih i kompenzovanih mreža, opasnost od koincidencije kvara i približavanja vrlo je velika čak i pri brzoj eliminaciji kvara (Tabela 6,7. slučajevi A.2 i A.3). Kod ovakvih mreža treba, znači, izborom uzemljivača i primenom drugih mera, obezbediti bezopasne napone dodira i koraka kod stubova pri zemljospojevima.

Analiza izvedena za stubove kod kupališta i kamping prostora pokazuje da opasnost od sticaja kritičnih okolnosti postoji u mrežama kod kojih se zemljospojevi eliminišu tek posle više časova (slučajevi B.2 i B.3). Kod primene zemljospojne zaštite opasnost je manja, čak i neznatna, ako se ima u vidu da se u letnjim mesecima broj kvarova na vodovima smanjuje i da su pri proračunima pretpostavljeni dosta kritični uslovi. Pošto su, međutim, kod razmatranih objekata osobe koje mogu biti izložene opasnim naponima po pravilu neodevene, verovatnoća električnog udara kod svakog sticaja kritičnih uslova je velika. Iz navedenog razloga može se i u razmatranom slučaju preporučiti primena mera za otklanjanje opasnih napona.

Karakterističnim za analizu opasnosti mogu biti i stubovi na obradivim površinama i kraj neasfaltiranih kolskih puteva. Potrebe za održavanjem bezopasnih napona dodira i koraka mogu se u svakom konkretnom slučaju ustanoviti primenom izvedenih izraza, na osnovu procene učestanosti i trajanja opasnog približavanja [97]. Navedene mere obično neće biti potrebne kod stubova na obradivim površinama.

6.8.2. KARAKTERISTIKE UZEMLJENJA STUBOVA

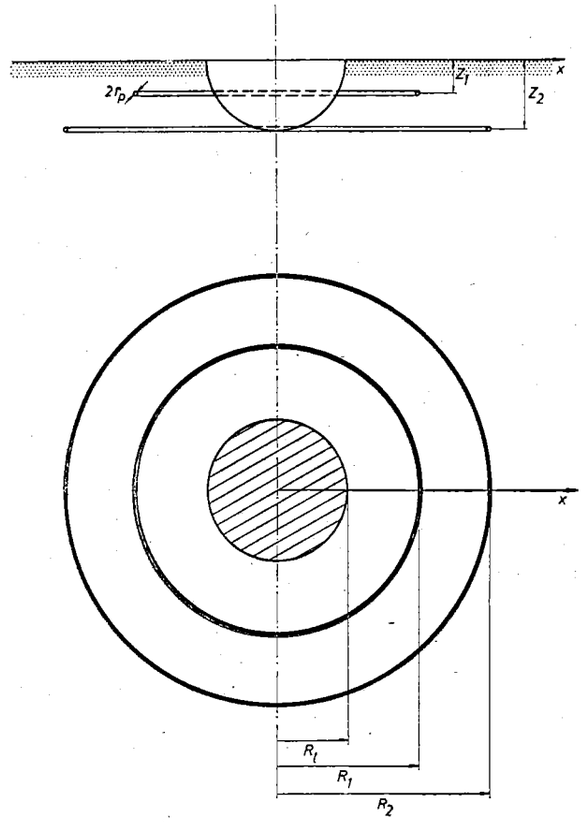
Kod dimenzionisanja uzemljivača metalnih ili armirano-betonskih stubova treba voditi računa i o uticaju temelja stuba. Pri tom se cilindrični temelj može obuhvatiti kao vertikalni cevasti uzemljivač a rešetkasti približno zameniti poluloptom čija je površina jednaka spoljnoj površini temelja. Kako su pokazala mnoga merenja, beton u temelju zbog kapilarne vlage dobija specifičnu otpornost blisku otpornosti okolnog tla, tako da se ne mora posebno uvažavati.

Karakteristike uzemljenja stubova, uz obuhvatanje uticaja temelja na opisani način, analizirane su u [97, 99] za različite oblike uzemljivača, primenom računara.

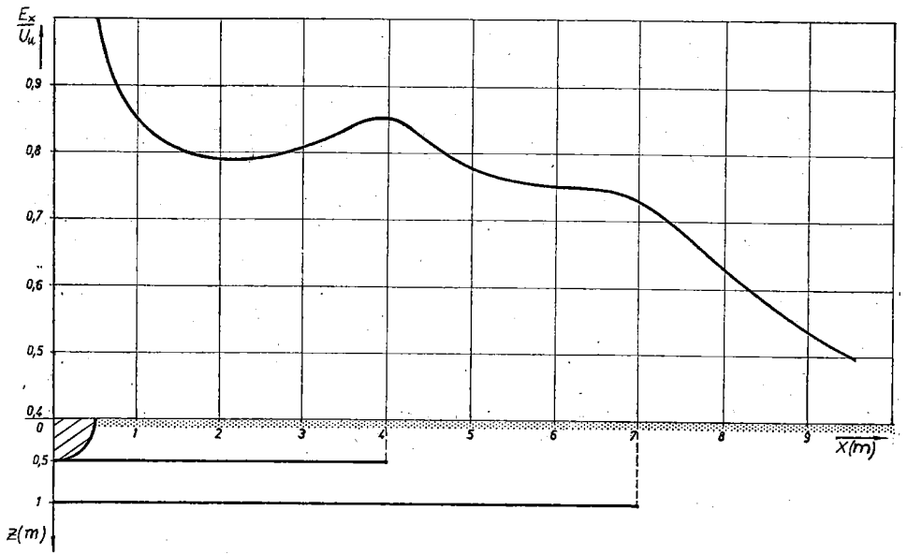
Na sl. 6.51 prikazana je konfiguracija uzemljenja sa temeljom stuba obuhvaćenim preko polulopte. Uzemljivač je izveden u obliku dva kružna prstena zakopana na dubine Z_1=0,5 m i Z_2=1 m. Ekvivalentni prečnik poprečnog preseka prstenova odgovara traci $1\times(30\times4)$ mm.

U proračunima su varirani parametri R_t, R_1 i R_2. Za svaku kombinaciju parametara računata je raspodela potencijala na površini tla na radijalnom pravcu i određeni koeficijenti dodira, koraka i otpornosti rasprostiranja.

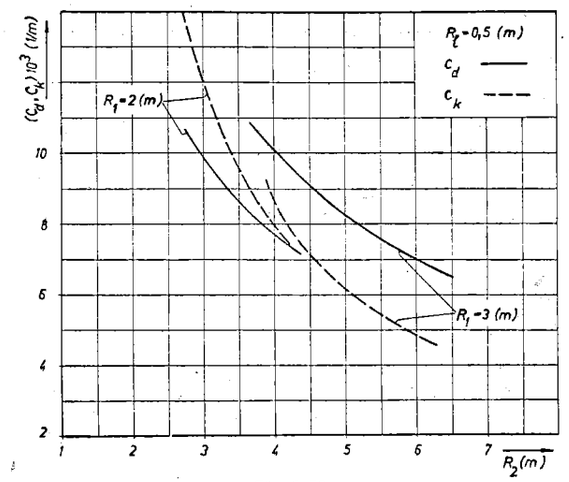
Na slici 6.52 prikazana je primera radi, raspodela potencijala za slučaj R_t=0,5 m, R_1=4 m, R_2=7 m.



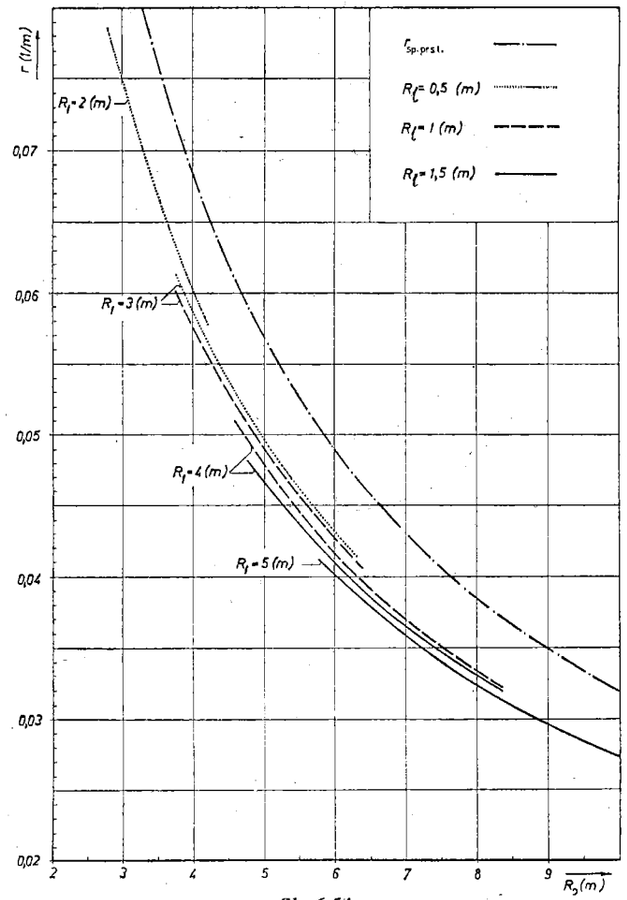
Sl. 6.51



Sl. 6.52



Sl. 6.53

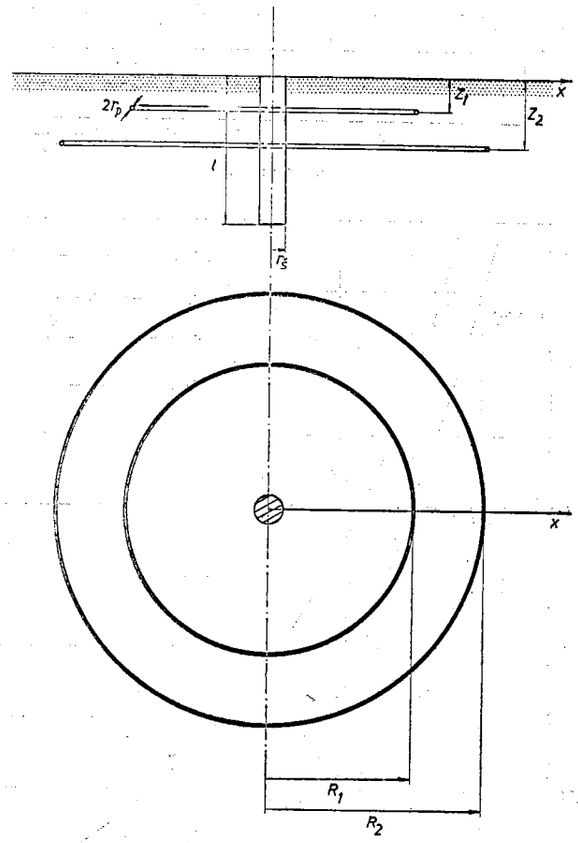


Sl. 6.54

Dijagram na sl. 6.53 daje vrednosti c_d i c_k za razmatrani oblik uzemljenja za R_l=0,5 m i različite vrednosti R_1 i R_2.

Dijagrami na sl. 6.54 pokazuju vrednosti koeficijenta otpornosti rasprostiranja razmatrane konfiguracije za više vrednosti R_l, R_1 i R_2. Na dijagramu su dati koeficijenti otpornosti koji bi se imali kada bi postojao samo spoljni prsten.

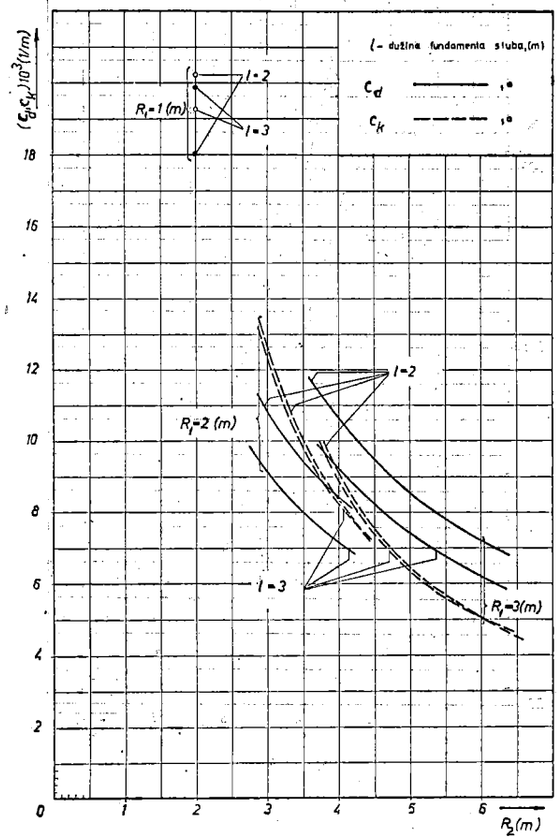
Slika 6.55 prikazuje sistem uzemljenja stuba sa cilindričnim temeljom. I ovde je usvojeno Z_1=0,5 m i Z_2=1 m. Za poluprečnik temelja uzeta je vrednost r_s=0,15 m.



Sl. 6.55

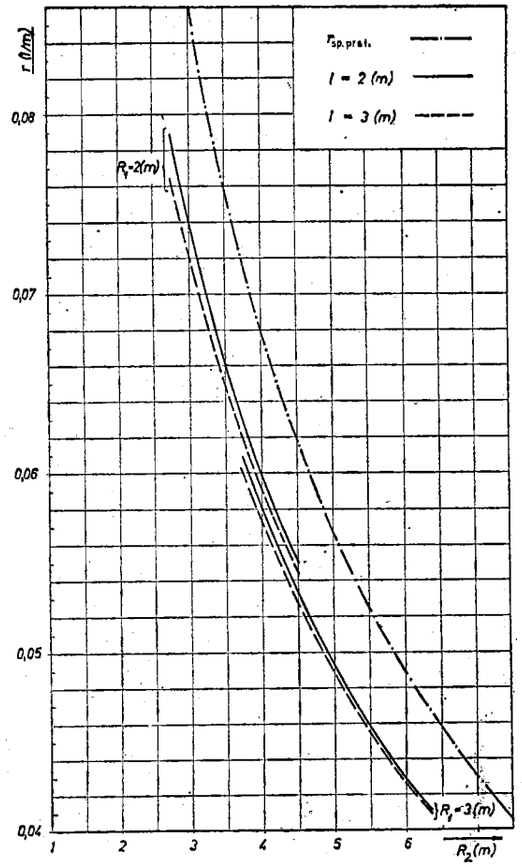
Nađene vrednosti koeficijenata dodira, koraka i otpornosti rasprostiranja za pomenuti oblik uzemljenja prikazane su u vidu dijagrama na sl. 6.56 i 6.57. Na sl. 6.57 date su i vrednosti koeficijenta otpornosti kada bi postojao samo spoljni prsten.

Na sl. 6.58 prikazana je konfiguracija uzemljenja sa četiri kružna prstena koja se često koristi kod stubova 10 kV sa linijskim rastavljačem, radi smanjivanja po-



Sl. 6.56

tencijalne razlike dodira. Na sl. 6.59 pokazana je relativna raspodela potencijala $\frac{E_x}{U_u}$, na radijalnom pravcu od ose stuba.



Sl. 6.57

6.8.3. UTICAJ ZAŠTITNOG PROVODNIKA

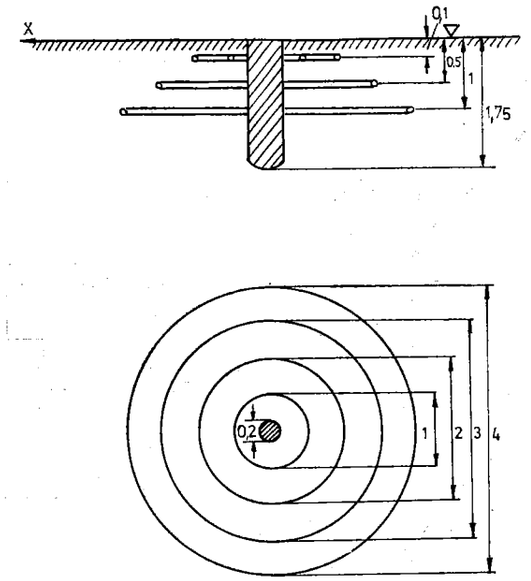
Zaštitni provodnik, kao električna spona sa uzemljenjima susednih stubova, preuzima znatan deo struje zemljospoja pri kvaru na stubu. Kako se vidi sa sl. 6.60, deo struje kvara koji se odvodi kroz zemlju, merodavan za proračun opasnih napona kod stuba, može se odrediti iz odnosa

$$R_s \underline{I}_s = \underline{Z}_u \underline{I}_z \tag{6.188}$$

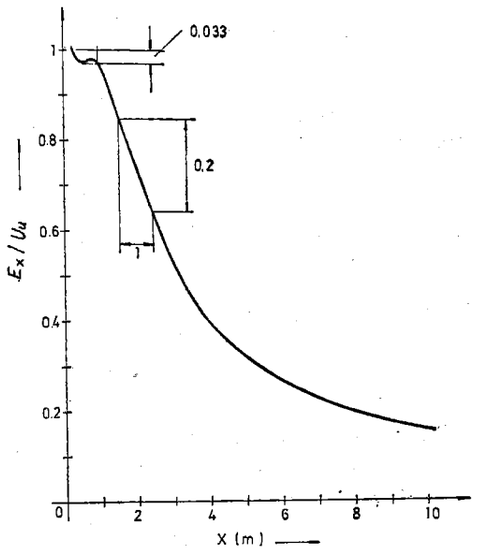
U (6.188) je sa

$$\underline{Z}_u = \frac{R_s \frac{\underline{Z}_{zp}}{2}}{R_s + \frac{\underline{Z}_{zp}}{2}} \tag{6.189}$$

označena ekvivalentna impedansa stuba (pogledati Odeljak 6.3). U (6.188) i šemi na sl. 6.60 nije obuhvaćena magnetna sprega faznih provodnika i zaštitnog užeta koja je obično od malog uticaja.



Sl. 6.58

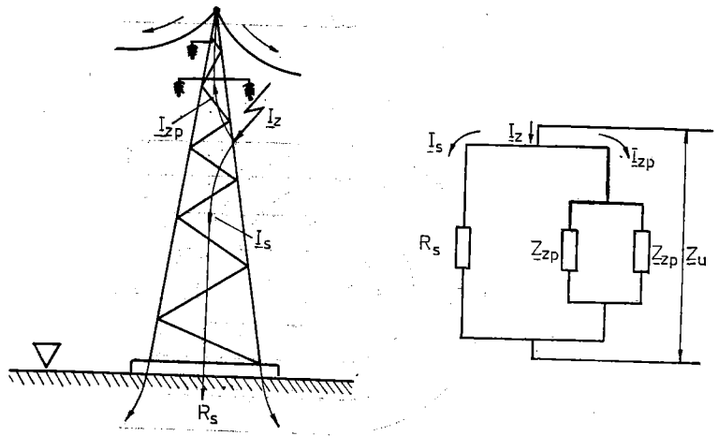


Sl. 6.59

Iz (6.188) i (6.189) se dobija

$$\underline{I}_s = \frac{\underline{Z}_{zp}}{2R_s + \underline{Z}_{zp}} \underline{I}_z . \tag{6.190}$$

Pošto je po pravilu $Z_{zp} \ll R_s$, struja koja se odvodi preko uzemljenja stuba biće znatno manja od struje jednofaznog zemljospoja.



Sl. 6.60

6.8.4. IZBOR I DIMENZIONISANJE UZEMLJIVAČA

Ako je mreža uzemljena preko male impedanse, ekvivalentna otpornost uzemljenja svih metalnih i armirano-betonskih stubova mora da bude dovoljno mala da omogući delovanje zemljospojne zaštita. Zaštita će delovati ako je (Tačka 7.6.2)

$$I_z \geqslant K I_R , \tag{6.191}$$

gde je sa I_R označena struja reagovanja zaštite a sa K faktor sigurnosti, na primer $K=1{,}2$.

S obzirom na (1.30) iz (6.191) se dolazi do uslova (indeks v označava vod)

$$\frac{3\,U_{nf}}{|2\underline{Z}_{v\alpha} + \underline{Z}_{vo} + 3\underline{Z}_N + 3\underline{Z}_u|} \geqslant K I_R \tag{6.192}$$

Odnos (6.192) je za slučaj postojanja zaštitnog provodnika po pravilu ispunjen, tako da ga ne treba proveravati. Kada pomenutih provodnika nema, otpornost uzemljenja stuba R_s treba, saglasno (6.192), da zadovolji relaciju

$$\left| R_s + \underline{Z}_N + \frac{2\underline{Z}_{v\alpha} + \underline{Z}_{vo}}{3} \right| \leqslant \frac{U_{nf}}{K I_R} . \tag{6.193}$$

Uslov (6.193) zadovoljava se po pravilu lako jednom od konfiguracija uzemljivača iz 6.8.2.

Neka je, primera radi, mreža 10 kV uzemljena preko aktivne otpornosti $R_N=20\ \Omega$ i ima struju reagovanja zaštite $I_R=100$ A. Vod u kvaru napaja se jednostrano i do mesta kvara ima impedanse $\underline{Z}_\alpha=3+j\,1{,}75\ \Omega$ i $\underline{Z}_{v0}=3{,}05+j\,7{,}5\ \Omega$.

Zamenom navedenih vrednosti u (6.193) dobija se

$$\sqrt{(R_s+23{,}2)^2+(3{,}7)^2} \leqslant \frac{10\cdot 10^3}{3\cdot 1{,}2\cdot 100} = 48{,}2\,\Omega$$

odakle sledi $R_s \leqslant 24{,}9\ \Omega$. Nađena vrednost otpornosti rasprostiranja bi se mogla kod umerenih specifičnih otpornosti tla postići samim temeljom stuba, bez polaganja posebnih uzemljivača.

Kriterijum (6.193) ne treba primenjivati kod izolovanih i kompenzovanih mreža. Otpornost uzemljenja stubova ovih mreža proverava se samo u pogledu atmosferskih pražnjenja i može da ima znatne vrednosti, na primer 30 Ω i više.

Uzemljivači kod stubova kod kojih, prema procenama iz 6.8.1, treba sprečiti pojavu visokih napona dodira i koraka, biraju se, saglasno (6.160) i (6.161), iz uslova

$$U_d = \frac{c_d}{s_d}\,\rho\, I_s \leqslant U_{dd}$$

$$U_k = \frac{c_k}{s_k}\,\rho\, I_s \leqslant U_{kd},$$

iz kojih sledi

$$c_d \leqslant s_d \frac{U_{dd}}{\rho\, I_s} \tag{6.194}$$

odnosno

$$c_k \leqslant s_k \frac{U_{kd}}{\rho\, I_s} . \tag{6.195}$$

U (6.194) i (6.195) su sa U_{dd} i U_{kd} označeni dozvoljeni naponi dodira i koraka van postrojenja.

Dijagrami dati u Tački 6.8.2 omogućavaju jednostavan izbor konfiguracije uzemljivača koja zadovoljava navedene kriterijume.

Ako je uslove (6.194) i (6.195) teško ispuniti uzemljivačem, mogu se asfaltiranjem tla oko stuba ili nasipanjem šljunka povećati koeficijenti s_d i s_k. Kada je u pitanju veći broj susednih stubova, situacija se može kod svih stubova popraviti postavljanjem zaštitnog provodnika na odgovarajućem delu voda. Zbog efikasnog smanjivanja struje I_s pomenutim rešenjem uslovi (6.194) i (6.195) lako se, po pravilu, zadovoljavaju.

U izvesnim pojedinačnim slučajevima moguće je na kritičnoj lokaciji postaviti drveni stub ili kritični stub izvesti sa mehanički i električki pojačanom izolacijom.

7. RELEJNA ZAŠTITA, SIGNALIZACIJA I AUTOMATIKA

Na kvalitet određene mreže, koji se prvenstveno meri pouzdanošću u isporuci električne energije potrošačima, osetno utiču primenjena zaštita, automatika i signalizacija. Pomenuta »prateća tehnika« može da u dobroj meri umanji izvesne nedostatke pojedinih načina uzemljenja neutralne tačke i olakša eksploataciju mreže i smanji broj i trajanje prekida pogona.

Primena složenijih zaštita i kompletnija automatizacija pojedinih manipulacionih postupaka, međutim, čini postrojenja skupljim i težim za gradnju i održavanje. Kvarovi i otkazi u sekundarnim kolima, koji nisu retki kod složenih sistema, mogu najzad čak i nepovoljno da se odraze na pouzdanost mreže.

Pri izboru »prateće tehnike« treba, prema tome, težiti srednjim, racionalnim rešenjima koja su dobro proverena u praksi ili u dužem eksperimentalnom pogonu.

U narednim odeljcima izlažu se osnovni principi izbora zaštite u distributivnim mrežama sa različito uzemljenim neutralnim tačkama i prikazuju pojedina karakteristična rešenja.

7.1. KARAKTERISTIČNE VELIČINE MREŽE

Na sl. 7.1. prikazana je trofazna šema mreže sa jednofaznim zemljospojem na fazi »a«, na početnom kraju jednog od odlazećih vodova. Pretpostavljeno je da je neutralna tačka izvornog transformatora VN/SN (odnosno SN/SN) uzemljena preko impedanse $\underline{Z}_N$. Na slici su označene karakteristične nulte komponente struja i napona, značajne za izbor i podešenje zaštite.

Parametar R predstavlja prelaznu otpornost na mestu kvara, a sa Y su označene nulte otočne admitanse vodova. Indeks »1« odnosi se na vod u kvaru, a indeks »2« na jedan, bilo koji, ispravan vod.

Šeme impedansi za α i 0 — redosled prikazane su na sl. 7.2. a i b, respektivno (Tačka 1.1.1). Pomenute šeme odnose se na posmatrano mesto zemljospoja i nacrtane su pojednostavljeno, uz uobičajena zanemarenja koja se mogu učiniti pri analizi stacionarnih stanja.

U šemama je sa $\underline{Y}$ označena ukupna admitansa mreže za nulti redosled, a X_s i X_{s0} su reaktanse napojne mreže i transformatora za α- odnosno 0-redosled.

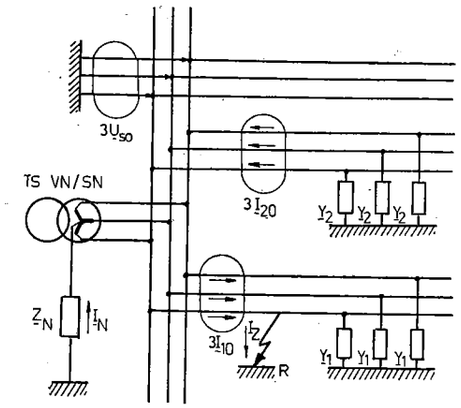
Impedanse mreže za posmatrano mesto kvara jednake su, kako se vidi sa slike 7.2,

$$\underline{Z}_\alpha = R + jX_s \tag{7.1}$$

i

$$\underline{Z}_0 = R + \frac{3\underline{Z}_N + jX_{so}}{1 + \underline{Y}(3\underline{Z}_N + jX_{so})}. \tag{7.2}$$

U praktičnim uslovima reaktanse napojne mreže su dosta male, tako da se mogu po pravilu zanemariti i izostaviti iz odgovarajućih ekvivalentnih šema. One dolaze do izražaja kod vrlo malih impedansi Z_N kakve se imaju kod direktnog uzemljenja neutralne tačke, koje se retko primenjuje u srednjenaponskim mrežama.

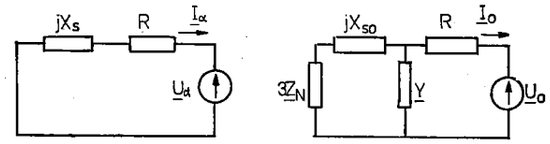


Sl. 7.1

Kompleksna amplituda struje zemljospoja jednaka je, saglasno (1.72) i (7.1) i (7.2), kada se zanemare reaktanse napojne mreže,

$$\underline{I}_z = \frac{U_{nf}(1 + 3\,\underline{Y}\,\underline{Z}_N)}{\underline{Z}_N + R(1 + 3\,\underline{Y}\,\underline{Z}_N)}. \tag{7.3}$$

U izrazu (7.3) se pretpostavlja da je radni napon pogođene faze jednak nazivnom. Ovaj je napon ujedno usvojen kao referentni za proračun faznih stavova.



Sl. 7.2

Nulta komponenta napona na napojnim sabirnicama može se, kada se zanemare reaktanse napojne mreže, izračunati iz uprošćene šeme 0-redosleda, prikazane na sl. 7.3,

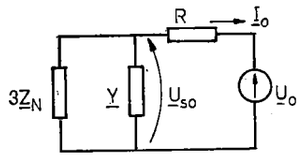
$$\underline{U}_{s0} = -\frac{3\underline{Z}_N}{1 + 3\,\underline{Y}\,\underline{Z}_N} I_0 = -\frac{\underline{Z}_N}{1 + 3\,\underline{Y}\,\underline{Z}_N} \underline{I}_z. \tag{7.4}$$

Tako se, s obzirom na (7.3), dobija

$$3\,\underline{U}_{s0} = -U_{nf}\frac{3\,\underline{Z}_N}{\underline{Z}_N + R(1+3\,\underline{Y}\,\underline{Z}_N)}. \tag{7.5}$$

Ovaj će napon biti registrovan na krajevima otvorenog trougla naponskih transformatora na napojnim sabirnicama.

Nulta komponenta struje koja teče po vodu u kvaru od sabirnica do mesta zemljospoja (sl. 7.1) dobija se kada se od nulte komponente struje kroz mesto kvara oduzme struja koja dotiče sa strane samog voda u kvaru, usled admitanse Y_1,



Sl. 7.3

$$\underline{I}_{10} = \underline{I}_0 - \underline{Y}_1\,\underline{U}_{s0}. \tag{7.6}$$

S obzirom na (7.3), (7.4) i (7.6) sledi

$$3\,\underline{I}_{10} = U_{nf}\frac{1+3\,(\underline{Y}-\underline{Y}_1)\,\underline{Z}_N}{\underline{Z}_N + R(1+3\,\underline{Y}\,\underline{Z}_N)}. \tag{7.7}$$

Izračunata struja registruje se strujnim transformatorima na vodu.

Nulta komponenta struje koja teče po svakom ispravnom vodu kod razmatranog zemljospoja može se izračunati kao

$$\underline{I}_{20} = -\underline{Y}_2\,\underline{U}_{s0}. \tag{7.8}$$

Iz (7.8) i (7.5) sledi

$$3\,\underline{I}_{20} = U_{nf}\frac{3\,\underline{Y}_2\,\underline{Z}_N}{\underline{Z}_N + R(1+3\,\underline{Y}\,\underline{Z}_N)}. \tag{7.9}$$

Struja kroz impedansu za uzemljenje jednaka je (sl. 7.1)

$$\underline{I}_N = -\frac{\underline{U}_{s0}}{\underline{Z}_N}$$

ili, s obzirom na (7.5),

$$\underline{I}_N = \frac{U_{nf}}{\underline{Z}_N + R(1+3\,\underline{Y}\,\underline{Z}_N)}. \tag{7.10}$$

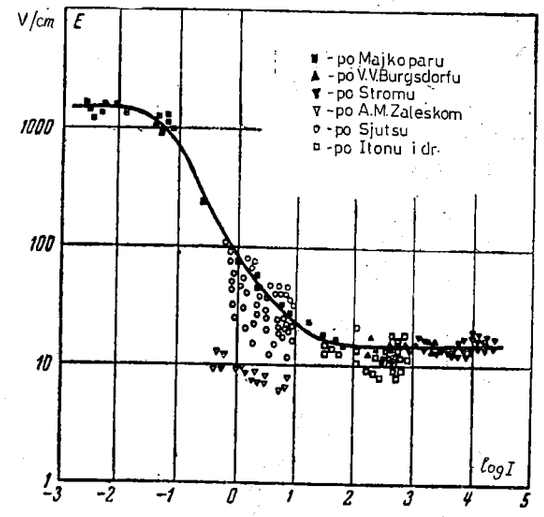
7.2. PRELAZNA OTPORNOST NA MESTU KVARA

Znatnije otpornosti na mestu kvara mogu se očekivati po pravilu samo kod vazdušnih vodova. Ovde do jednofaznih zemljospojeva dolazi najčešće preko električnog luka koji se uspostavlja između faznog provodnika i stuba kao posledica prenapona i zaprljanosti ili oštećenja izolatora. Visoke prelazne otpornosti imaju se takođe kod pada provodnika na tlo.

Uslovi obrazovanja električnog luka vrlo su složeni i njegove karakteristike jako zavise od spoljnih činilaca kao što su vlažnost vazduha, temperatura, i naročito vetar.

Uticaj vetra superponira se sa dejstvom elektrodinamičkih sila i termičkih strujanja koja normalno prate pojavu luka i dovodi do produžavanja staze luka a često i njegovog prekida.

Karakteristike električnog luka istraživali su eksperimentalno mnogi autori. Na sl. 7.4 prikazana je kriva koja daje zavisnost pada napona po jedinici dužine električnog luka od struje, kod stabilnog luka pri normalnim atmosferskim prilikama [58]. Na dijagramu su ucrtani rezultati merenja nekoliko autora.



Sl. 7.4

Može se očekivati da se trajni zemljospojevi preko luka ponašaju približno slično kao ispitivani laboratorijski modeli, tako da navedeni rezultati omogućavaju dobre orijentacione procene uslova rada zaštite kod ovakvih kvarova.

Električna otpornost stabilnog luka, po jedinici dužine luka, može se izračunati kao

$$\frac{R}{l} = \frac{E}{I}. \tag{7.11}$$

Na osnovu krive na sl. 7.4, na sl. 7.5. prikazana je zavisnost parametra $\frac{R}{l}$ od struje luka.

Kako se vidi, istraživana zavisnost može se, u celom opsegu eksperimentalnih podataka, dobro aproksimirati relacijom

$$\log\frac{R}{l} = 4{,}25 - 1{,}35\log I. \tag{7.12}$$

Formula (7.12) predstavlja jednačinu prave koja sa minimalnim greškama aproksimira funkciju $\log\frac{R}{l} = f(\log I)$ na sl. 7.5. Pomenuta prava je na dijagramu predstavljena isprekidanom linijom.

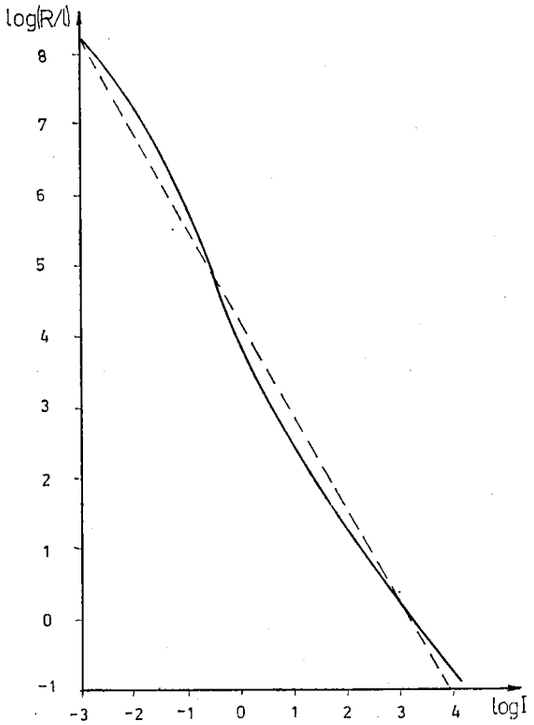
Iz izraza (7.12) jednostavnim transformacijama dolazi se do odnosa

$$R=\frac{17800}{I^{1,35}}\,l \tag{7.13}$$

Nađena zavisnost vrlo je slična formuli koju je ustanovio Voringtоn (Warrington)

$$R=\frac{28700}{I^{1,4}}\,l, \tag{7.14}$$

takođe na osnovu rezultata laboratorijskih merenja [40].

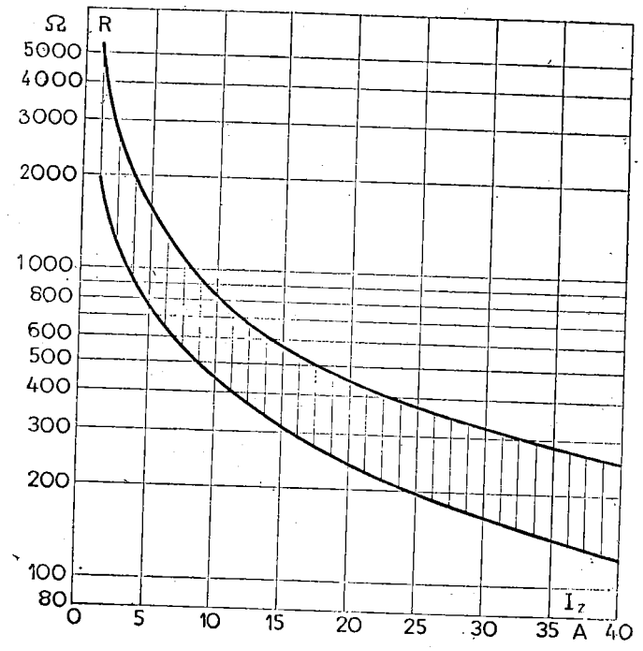


Sl. 7.5

Kod mreža srednjeg napona, rastojanja faznih provodnika od uzemljenih delova na stubovima nisu veća od nekoliko desetina cm a dužine stabilnih lukova su jedva nešto veće od ovih rastojanja. Zbog relativno malih l, otpornosti R kod razmatranih mreža nemaju velike vrednosti, naročito kod mreža uzemljenih preko male impedanse, koje se odlikuju povećanim strujama zemljospoja. Primera radi, za I=300 A i l=0,5 m iz (7.13) se izračunava $R\approx$4,0 Ω. Za iste uslove (7.14) daje R=4,9 Ω. Pošto su vrednosti otpornosti luka po pravilu manje od impedanse za uzemljenje to se kod mreža uzemljenih preko male impedanse ovakvi kvarovi obično ne ispoljavaju kao »visokoomski«.

Sasvim drugačija je situacija kod mreža sa izolovanom neutralnom tačkom ili kompenzacionih mreža koje po prirodi, nezavisno od vrednosti otpornosti na mestu kvara, imaju male struje zemljospoja. Moguće vrednosti otpornosti luka u ovom slučaju leže u intervalu od reda 100 Ω do 10 kΩ i više, pri čemu su više vrednosti karakteristične za izolovane mreže sa malim strujama zemljospoja, kakve su čisto vazdušne mreže. Treba, međutim, imati u vidu da većina navedenih kvarova nema stabilan karakter zbog izduženja luka, koje dovodi do samogašenja.

Prelazna otpornost kod zemljospoja uspostavljenog padom provodnika na tlo zavisi od vrste zemljišta i njegove specifične otpornosti, kao i vrednosti struje zemljospoja. Na sl. 7.6. prikazani su rezultati merenja pomenutog otpora u toku više godina u mrežama 15 i 20 kV u Poljskoj [77].



Sl. 7.6

Na dijagramu je prikazan opseg izmerenih srednjih vrednosti otpornosti pri ponovljenim merenjima u zavisnosti od srednje vrednosti struje jednofaznog zemljospoja u eksperimentima. Specifična električna otpornost tla imala je vrednosti u opsegu 20 do 565 Ωm.

Iz dijagrama na sl. 7.6. može se zaključiti da se kod mreža sa većim strujama zemljospoja, kakve su pre svega mreže uzemljene preko male impedanse, i kod pada provodnika prelazni otpori retko prevazilaze vrednosti reda 100 Ω.

Navedeni podaci u dobrom su skladu sa rezultatima analize pogona mreža 15 i 20 kV Francuske u toku više godina [100], koji su dati u 8. Poglavlju.

7.3. MERENJE NULTIH KOMPONENTI NAPONA I STRUJA

7.3.1. MERENJE NULTIH KOMPONENTI NAPONA

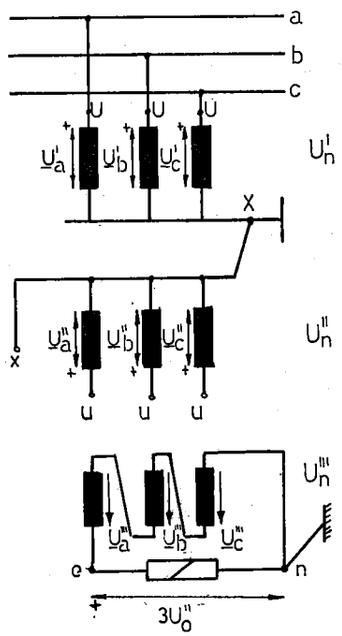
Nulte komponente napona na sabirnicama napojnog transformatora mere se preko merne grupe naponskih transformatora koja se sastoji od tri monofazna jednopolno izolovana transformatora sa dva sekundarna namotaja (sl. 7.7). Primarni, visokonaponski namotaji i prvi sekundarni namotaji transformatora spregnuti su u zvezdu sa direktno uzemljenom neutralnom tačkom, a drugi sekundarni namotaji u otvoren trougao.

Jednofazni zemljospoj u mreži može se neposredno registrovati merenjem faznih napona na prvom sekundaru, na osnovu koga se utvrđuje i koja je faza u kvaru.

Za otkrivanje zemljospojeva uopšte, kako trajnih tako i prolaznih, koristi se napon meren između krajeva otvorenog trougla, koji je srazmeran trostrukoj nultoj komponenti napona mreže. Između krajeva otvorenog trougla pojavljuje se napon koji predstavlja zbir napona faza. Ovaj je napon prema (II.12) jednak trostrukoj nultoj komponenti napona

$$\underline{U}_a''' + \underline{U}_b''' + \underline{U}_c''' = 3\,\underline{U}_0''', \qquad (7.15)$$

što smo hteli i pokazati.



Sl. 7.7

Napon $3\,\underline{U}_0'''$ je direktno proporcionalan merenom naponu mreže $3\,\underline{U}_0'$ samo kada nema grešaka u transformaciji, sa kojima se, međutim, zbog nesavršenosti naponskih transformatora, mora računati.

Kompleksna greška naponskog transformatora u transformaciji primar — drugi sekundar, može se definisati kao

$$\underline{g}_k = \frac{m_{13}\,\underline{U}_k''' - \underline{U}_k'}{\underline{U}_k'} \quad k = a, b, c, \qquad (7.16)$$

gde je sa m_{13} označen odnos preobražaja primar — drugi sekundar

$$m_{13} = \frac{U_n'}{U_n'''}, \qquad (7.17)$$

pri čemu je po pravilu $U_n''' = 100/3$ V.

Greške $\underline{g}_k$ obuhvataju odstupanja u transformaciji kako vrednosti napona, tako i njegovog faznog stava. Budući da pomenute greške zavise, zbog zasićenja, osetno od napona U_k', one se obično razlikuju za transformatore u različitim fazama.

Na osnovu (7.16) može se pisati

$$\underline{U}_k''' = \frac{1}{m_{13}}\,\underline{U}_k'\,(1 + \underline{g}_k) \qquad k = a, b, c \qquad (7.18)$$

tako da se za $3\,\underline{U}_0'''$ ima, saglasno (7.15),

$$3\,\underline{U}_0''' = \frac{1}{m_{13}} \sum_{k=a,b,c} \underline{U}_k'\,(1 + \underline{g}_k) =$$

$$= \frac{1}{m_{13}} \sum_{k=a,b,c} \underline{U}_k' + \frac{1}{m_{13}} \sum_{k=a,b,c} \underline{g}_k\,\underline{U}_k' \qquad (7.19)$$

Pri tome je

$$\sum_{k=a,b,c} U_k' = 3\,U_0'. \qquad (7.20)$$

Na sličan način kao za jedan naponski transformator može se odrediti i greška cele šeme u merenju nultih komponenti

$$\underline{g}_0 = \frac{m_{13}\,3\,\underline{U}_0''' - 3\,\underline{U}_0'}{3\,\underline{U}_0'} = m_{13}\,\frac{3\,\underline{U}_0'''}{3\,\underline{U}_0'} - 1. \qquad (7.21)$$

S obzirom na (7.19) i (7.20), izraz (7.21) dobija jednostavan oblik

$$\underline{g}_0 = \Big(\sum_{k=a,b,c} \underline{g}_k\,\underline{U}_k'\Big)\Big(\sum_{k=a,b,c} \underline{U}_k'\Big)^{-1}. \qquad (7.22)$$

Iz (7.22) se zaključuje da greška $\underline{g}_0$ može da bude osetno veća od grešaka transformatora pojedinačno, ako se ove međusobno razlikuju. Ovo je čest slučaj kako zbog neidealne podudarnosti karakteristika transformatora, tako i zbog različitih napona u poremećenim režimima a i različitog opterećenja prvog sekundara.

Pošto nulta komponenta napona u kompenzovanim i izolovanim mrežama, u kojima se koristi za aktiviranje zaštite ili signalizacije, ima znatne vrednosti, greške u transformacijama efektivnih vrednosti nultih napona nisu od većeg praktičnog značaja. Nepovoljan uticaj na rad zemljospojne zaštite može, međutim, da ima greška u faznom stavu.

7.3.2. MERENJE NULTIH KOMPONENTI STRUJA

Trostruka nulta komponenta struje na vodovima i drugim trofaznim sistemima provodnika u postrojenjima (transformatorske veze, spojna polja i dr.) može se registrovati preko tri strujna transformatora sa sekundarnim namotajima spregnutim u zvezdu (sl. 7.8). Kroz zajednički povratni provodnik protiče zbir sekundarnih struja strujnih transformatora koji, prema definiciji, predstavlja trostruku nultu komponentu ovih struja

$$3\,\underline{I}_0'' = \underline{I}_a'' + \underline{I}_b'' + \underline{I}_c''. \qquad (7.23)$$

Prikazani način vezivanja transformatora naziva se često »Holmgrin-šemom« (Holmgreen), prema autoru.

U razmatranja ćemo opet uvesti, u analogiji sa (7.16), kompleksne greške strujnih transformatora

$$\underline{g}_k = \frac{m\underline{I}_k'' - \underline{I}_k'}{\underline{I}_k'} \qquad k = a, b, c \qquad (7.24)$$

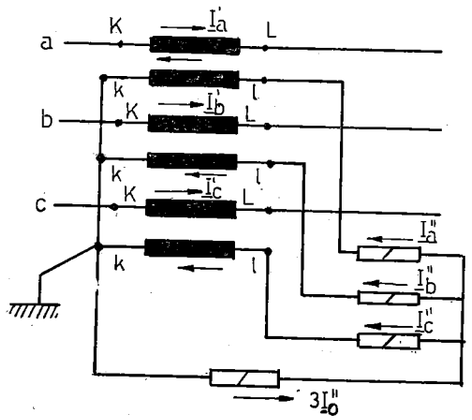
i kompleksnu grešku merenja trostruke nulte komponente

$$\underline{g}_0 = \frac{m\,3\,\underline{I}_0'' - 3\,\underline{I}_0'}{3\,\underline{I}_0'} \tag{7.25}$$

U (7.24) i (7.25)

$$m = \frac{I_n'}{I_n''} \tag{7.26}$$

predstavlja odnos preobražaja strujnih transformatora.



Sl. 7.8

Na osnovu istih razmatranja kao ranije dobija se

$$3\,\underline{I}_0'' = \frac{1}{m}\,3\,\underline{I}_0' + \frac{1}{m}\sum_{k=a,\,b,\,c}\underline{g}_k\,\underline{I}_k' \tag{7.27}$$

i

$$\underline{g}_0 = \Big(\sum_{k=a,\,b,\,c}\underline{g}_k\,\underline{I}_k'\Big)\Big(\sum_{k=a,\,b,\,c}\underline{I}_k'\Big)^{-1}. \tag{7.28}$$

Greška $\underline{g}_0$, kako se vidi, takođe može da bude znatno veća od grešaka strujnih transformatora pojedinačno kada se ove znatno razlikuju. Do ovakvih razlika dolazi usled nepotpune podudarnosti karakteristika transformatora, nejednakih primarnih struja i nejednakog opterećenja sekundara.

Iz izraza (7.27) vidi se da se kod različitih $\underline{g}_k$ može pojaviti nulta komponenta $3\,I_0''$ čak i kada je $3\,\underline{I}_0' = \sum_{k=a,\,b,\,c}\underline{I}_k' = 0$, tj. kada u mreži ne postoje nulte komponente. Uopšte, kada su struje $3\,I_0'$ male u poređenju sa faznim strujama I_k', drugi član u (7.27) može osetno uticati na struju $3\,I_0'$, kako u pogledu vrednosti, tako i faznog stava.

Kod mreža sa strujama jednofaznog zemljospoja malim u poređenju sa radnim strujama biće i u slučaju jednofaznog zemljospoja,

$$\underline{I}_a' + \underline{I}_b + \underline{I}_s' \simeq 0, \tag{7.29}$$

Pretpostavimo, na primer, da su struje u fazama jednake nazivnim strujama strujnih transformatora

$$I_k' \approx I'_n \qquad k = a,\ b,\ c \tag{7.30}$$

i da pri transformaciji struja pojedini transformatori unose greške

$$\underline{g}_a = \underline{g}_n \qquad \underline{g}_b = \underline{g}_c = 0{,}5\,\underline{g}_n. \tag{7.31}$$

U (7.31) je sa $\underline{g}_n$ označena kompleksna greška transformatora pri nazivnoj primarnoj struji i nazivnom opterećenju.

U skladu sa (7.27) i (7.28) merna šema registrovaće zadovoljavajuće verno struju $3\,\underline{I}_0'$ ako bude

$$\frac{\Big|\sum_k \underline{g}_k\,\underline{I}_k'\Big|}{3\,I_0'} < \frac{1}{K}, \tag{7.32}$$

gde smo sa K označili određeni dovoljno veliki broj.

Za uslove (7.29) do (7.31) biće

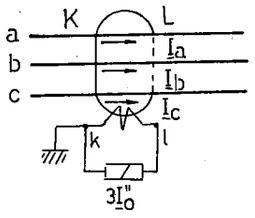
$$\Big|\sum_k \underline{g}_k\,\underline{I}_k'\Big| \approx \frac{1}{2}\,g_n\,I_n' \tag{7.33}$$

tako da se iz (7.32) dobija

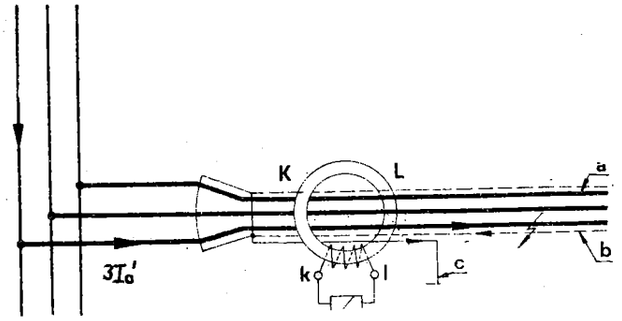
$$\frac{3\,I_0'}{I_n'} > \frac{K g_n}{2}. \tag{7.34}$$

Ako su, primera radi, transformatori klase 0,5 i usvoji se $K=10$, iz (7.34) se izračunava

$$\frac{3\,I_0'}{I_n'} > \frac{10\cdot 0{,}5\cdot 10^{-2}}{2} = \frac{1}{40}.$$



Sl. 7.9

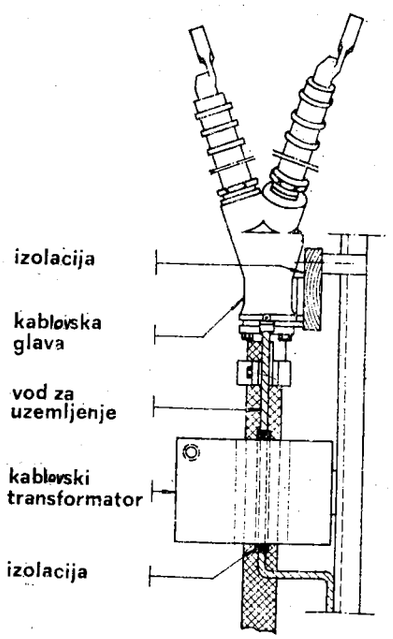


Sl. 7.10

Izvedena gruba analiza pokazuje da se sa razmatranom šemom mogu imati teškoće kod izolovanih i kompenzovanih mreža, koje se odlikuju malim vrednostima struja $3\,I_0'$.

Na sl. 7.9. prikazana je šema merenja nultih komponenata primenom obuhvatnog strujnog transformatora. Pomenuti transformator izveden je sa prstenastim magnetnim kolom kojim se obuhvataju sva tri fazna provodnika u kojima se želi meriti nulta komponenta struja. Iz konstruktivnih razloga navedeni transformatori primenjuju se po pravilu isključivo kod kablovskih vodova, prvenstveno trožilnih, tako da se često nazivaju »kablovski transformatori«.

Kod obuhvatnog transformatora primarnu struju predstavlja zbir struja u fazama, tj. neposredno trostruka nulta komponenta $3\,I_0'$.



Sl. 7.11

Greška transformacije nulte komponente poklapa se, prema tome sa greškom transformatora

$$\underline{g}_0=\underline{g}, \tag{7.35}$$

i sekundarna je struja, saglasno (7.25), jednaka

$$3\,\underline{I}_0''=\frac{1}{m}\,3\,I_0'\,(1+\underline{g}). \tag{7.36}$$

Relacije (7.35) i (7.36) pokazuju da se sa obuhvatnim transformatorom nulta komponenta registruje vrlo tačno, nezavisno od režima primarnih kola i odnosa nultih i faznih struja.

Izvedene procene grešaka transformatora su orijentacionog karaktera. Tačnije analize morale bi da obuhvate i uticaj viših harmonika, usled zasićenja magnetnog kola.

Na sl. 7.10. prikazan je, šematski, način postavljanja obuhvatnog transformatora.

Vod za uzemljenje kabla (*c*), kako se vidi, provlači se takođe kroz obuhvatni transformator, kako bi struja koja protiče kroz njega u slučaju kvara, poništila uticaj struje kroz plašt (*b*) kabla. Ova bi struja inače u znatnoj meri kompenzovala struju kroz pogođenu fazu, tako da bi kvar mogao da ostane neregistrovan.

Datom šemom vezivanje obuhvaćeni su i jednofazni zemljospojevi u kablovskoj završnici (»glavi«). Kod pomenutih kvarova struja zemljospoja bi se odvodila preko voda (*c*) ka uzemljenju postrojenja što bi prouzrokovalo struju u sekundaru transformatora.

Način izvođenja veza prema sl. 7.10 pri montaži, prikazan je na sl. 7.11.

Kablovska završnica izoluje se od uzemljenih delova podesnim izolacionim umetkom, na primer od drveta. Vod za uzemljenje takođe treba, na delu kroz transformator, izolovati od plašta.

7.4. MREŽE SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM

7.4.1. KARAKTERISTIČNE VELIČINE

Izrazi za karakteristične veličine mreže kada je ova izvedena sa izolovanom neutralnom tačkom dobijaju se kao granični slučajevi opštih formula u 7.1 pri $Z_N\to\infty$.

Napon $3\,\underline{U}_{s0}$ koji se pojavljuje na napojnim sabirnicama jednak je, tako, saglasno (7.5),

$$3\,\underline{U}_{s0}=\frac{3\,U_{nf}}{1+3\,R\underline{Y}}. \tag{7.37}$$

Kod kvarova sa malom prelaznom otpornošću je

$$3\,RY\ll 1, \tag{7.38}$$

pa je približno

$$3\,\underline{U}_{s0}=-3\,U_{nf}. \tag{7.39}$$

Odnos (7.38) može se imati i kada prelazna otpornost R nije zanemarljiva ako je reč o mrežama male prostranosti, a posebno vazdušnim mrežama, koje se odlikuju malim vrednostima admitanse Y.

Primera radi, neka je distributivna mreža vazdušna, ukupne dužine 10 km, sa nultim kapacitetom $5\cdot 10^{-9}$ F/km. Pretpostavimo da prelazni otpor na mestu kvara iznosi 1000 Ω. Ako se u (7.38) zanemari uticaj male aktivne odvodnosti vodova, za posmatrani slučaj će se imati

$$3\,RY=3\,R\omega C=3\cdot 10^3\cdot 314\cdot 5\cdot 10^{-9}=4{,}71\cdot 10^{-3}\ll 1.$$

Kod kablovskih mreža bi se, za iste ostale uslove, dobila oko 20÷30 puta veća vrednost razmatranog parametra što još uvek zadovoljava (7.38).

Struja $3\,\underline{I}_{10}$ koja teče po vodu u kvaru od napojnih sabirnica jednaka je, s obzirom na (7.7),

$$3\,\underline{I}_{10}=\frac{3\,(\underline{Y}-\underline{Y}_1)\,U_{nf}}{1+3\,R\underline{Y}}. \tag{7.40}$$

Kada je ispunjen uslov (7.38), dobija se

$$3\,\underline{I}_{10}=3\,(\underline{Y}-\underline{Y}_1)\,U_{nf} \tag{7.41}$$

Struja $3\,\underline{I}_{20}$ koja preko posmatranog ispravnog voda dolazi ka napojnim sabirnicama biće, na osnovu (7.9),

$$3\,\underline{I}_{20}=\frac{3\,\underline{Y}_2\,U_{nf}}{1+3\,R\underline{Y}} \tag{7.42}$$

ili, ako važi (7.38),

$$3\,\underline{I}_{20}=3\,\underline{Y}_2\,U_{nf}. \tag{7.43}$$

Za zemljospojnu zaštitu je, pored razmatranih veličina, značajna i reaktivna snaga merena za vod u kvaru i ispravne vodove u nultom sistemu.

Pomenuta snaga za vod u kvaru iznosi

$$Q_{10} = I_m\{3\,\underline{U}_{so} \cdot 3\,\underline{I}_{10}^*\} = I_m\left\{-9\frac{U_{nf}^2(\underline{Y}^* - \underline{Y}_1^*)}{|1+3\,R\underline{Y}|^2}\right\} \tag{7.44}$$

Ako se zanemari uticaj R i aktivnih odvodnosti u admitansama $\underline{Y}$ i $\underline{Y}_1$, iz (7.44) se izračunava

$$Q_{10} = 9\,U_{nf}^2\,\omega\,(C - C_1). \tag{7.45}$$

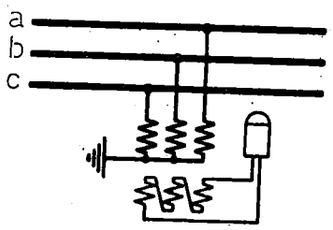
Za reaktivnu snagu ispravnog voda, dobija se, vodeći računa o smeru struje $3\,\underline{I}_{20}$,

$$Q_{20} = I_m\{3\,\underline{U}_{so}(-3\,\underline{I}_{20}^*)\} \approx -9\,U_{nf}^2\,\omega\,C_2. \tag{7.46}$$

7.4.2. NESELEKTIVNA SIGNALIZACIJA

Kako je pokazano u 7.4.1, u slučaju jednofaznog zemljospoja u mreži nulta komponenta napona dobija vrednosti bliske nazivnim faznim naponima, tako da se na krajevima otvorenog trougla merne sprege na sl. 7.7 dobija napon reda 100 V. Pomenuti napon predstavlja, prema tome, siguran indikator jednofaznog zemljospoja.

Principijelna šema signalizacije pokazana je na sl. 7.12.



Sl. 7.12

Pojava nulte komponente napona može se signalisati zvučno i svetlosno, kao i preko različito obojenih signalnih pokazivača. Signal se može prenositi na daljinu, u odgovarajući komandni ili dispečerski centar.

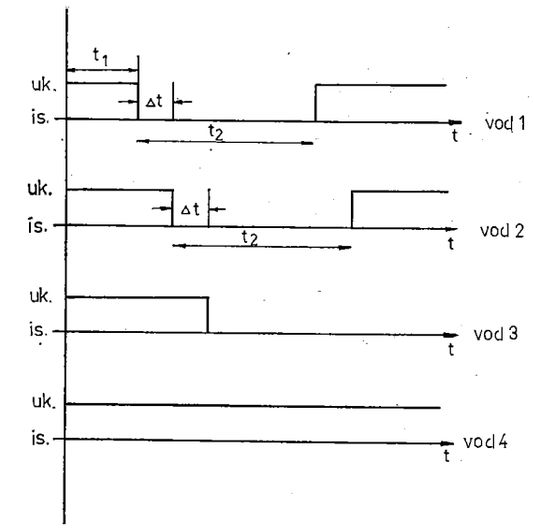
Signalizacija preko nulte komponente napona je jednostavna i jeftina, pošto se nulta komponenta može meriti samo u jednom postrojenju mreže. Ako se mreža napaja samo iz jedne transformatorske stanice, merna grupa naponskih transformatora i signalizacija ugrađuje se u ovom postrojenju.

Signalizacija preko napona na krajevima otvorenog trougla nije selektivna pošto, kako se vidi iz (7.37) odnosno (7.39), pomenuti napon ima praktično iste vrednosti nezavisno od mesta kvara u mreži. Pored toga, obično se, budući da su izvorne TS najčešće neposednute, ne može obezbediti brzo otkrivanje i isključivanje kvara ako se ne primeni skupa daljinska signalizacija.

Vod u kvaru otkriva se probnim isključenjem i ponovnim uključenjem vodova redom. Neispravan vod je onaj posle čijeg se isključenja izgubi signal zemljospoja. Pomenute operacije izvode se obično ručno od strane odgovarajućih dežurnih tehničkih ekipa.

Navedeni postupak može se s uspehom primeniti kod jednostavnih jednostrano napajanih radijalnih mreža. Kod petljastih i višestrano napajanih mreža pomenuti postupak zahteva često veliki broj usaglašenih manipulacija i postaje neugodan i za tehničko osoblje i potrošače, tako da se ne može preporučiti. Ovde takođe treba imati u vidu da su manipulacije u mreži sa zemljospojem često praćene osetnim prenaponima koji narušavaju izolaciju (Odeljak 3.5).

Manipulacije pri traženju voda u kvaru mogu se automatizovati. Automat koji obavlja pomenutu funkciju obično se naziva tragačem kvarova. Način rada tragača prikazan je šematski na sl. 7.13. Pomenuta slika pokazuje redosled uključenja i isključenja vodova koji polaze iz napojne transformatorske stanice, uz pretpostavku da je do zemljospoja došlo na vodu koji je treći prema predviđenom redosledu isključenja. Za svaki vod nacrtani su dijagrami uklopnog stanja u vremenu. Simbol »uk« odnosi se na stanje »vod pod naponom«, a simbol »is« na »isključen vod«. Dijagrami za pojedine vodove crtani su jedan ispod drugog prema redosledu delovanja automata. Vreme $t=0$ odgovara trenutku nastanka kvara, tj. trenutku pojave signala zemljospoja koji aktivira automatski tragač.



Sl. 7.13

Pošto je aktiviran signalom zemljospoja, automat, posle određenog vremenskog zatezanja, daje komandu isključenja prekidaču prvog voda tako da se pomenuti vod isključuje u trenutku t_1.

Kako se isključenjem prvog voda nije izgubio signal zemljospoja, automat prenosi komandu isključenja na prekidač drugog voda, opet sa određenim vremenskim kašnjenjem. Pošto je kod svih prekidača podešeno automatsko sporo ponovno uključenje, isključeni vodovi ponovo će se staviti pod napon posle isteka izabrane »beznaponske pauze« t_2.

Budući da je i drugi vod ispravan, komandu isključenja dobija treći vod. Kako je, prema pretpostavci, pomenuti vod u kvaru, posle izvršenog isključenja izgubiće se signal zemljospoja. Automat sprečava ponovno uključenje neispravnog voda, ne prenosi komandu isključenja na naredne vodove, i, najzad, sebe vraća u početno stanje.

Vremena t_1 i Δt treba izabrati dovoljno dugim da se izbegne isključenje prolaznih zemljospojeva. Trajanje beznaponske pauze t_2 može da bude i reda 1 min i duže, prema mogućnostima prekidača.

U slučaju zemljospoja na sabirnicama u napojnoj TS, signal zemljospoja će ostati i posle isključenja i poslednjeg voda. Ako se ne želi trajniji rad sa jednofaznim zemljospojem, ni po cenu naglog isključenja cele napajane mreže, automat se može programirati tako da, u razmatranom slučaju, da komandu isključenja prekidaču transformatora. Povoljnije ali složenije i skuplje rešenje je da se za navedene uslove predvidi daljinska signalizacija.

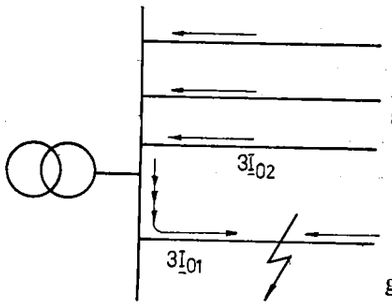
Opisani tragač kvarova može se dosta jeftino i jednostavno za ugradnju i održavanje realizovati primenom elektronskih logičkih kola — automata.

7.4.3. NAČINI OTKRIVANJA MESTA JEDNOFAZNIH ZEMLJOSPOJEVA

Otkrivanje mesta zemljospoja na osnovu vrednosti nultih komponenti struja

Kod radijalnih jednostrano napajanih mreža struja jednofaznog zemljospoja koja teče od izvornih sabirnica do mesta kvara jednaka je zbiru struja koje pritiču preko ispravnih vodova, tako da je po pravilu znatno veća od ovih struja pojedinačno (sl. 7.14). Zaista, iz (7.40) i (7.42) vidi se da između struje ispravnog i neispravnog voda postoji odnos s_2 jednak

$$s_2 = \frac{3I_{02}}{3I_{01}} = \frac{Y_2}{|\underline{Y} - \underline{Y}_1|}. \qquad (7.44)$$



Sl. 7.14

Ako su svi vodovi mreže jednakih karakteristika iz (7.47) sledi

$$s_2 = \frac{l_2}{\sum_{k=2}^{n} l_k}, \qquad (7.48)$$

gde smo sa l_k označili dužine pojedinih vodova.

Selektivnost signalizacije postigla bi se time što bi se prekostrujni relei, vezani da registruju nulte komponente struja, podesili da reaguju na zbirnu struju jednofaznog zemljospoja a ne reaguju na struje koje pri zemljospoju teku po vodovima kada su ovi ispravni. Reagovanje relea obeležava se signalnom značkom odgovarajuće boje.

Da bi se razmatrana razlika struja mogla iskoristiti za otkrivanje neispravnog voda, odnosi s_k za sve vodove mreže moraju da budu dosta mali. Time se izbegavaju netačna reagovanja usled grešaka strujnih transformatora, koje dobijaju na značaju kod malih struja zemljospoja, kao i usled grešaka i nesavršenosti prekostrujnih relea.

Opisani princip selektivnog otkrivanja zemljospoja neće se moći u dosta slučajeva primeniti zbog nedovoljno malih s_k. Tako je, na primer, u trivijalnom slučaju kada iz postrojenja polaze samo dva voda približno jednakih dužina za oba pomenuta voda kod kvarova u blizini napojnih sabirnica $s_k \approx 1$. Iste se prilike imaju i kod većeg broja vodova kada jedan ili dva voda imaju znatno veće kapacitivne struje od drugih vodova (ovakav se slučaj može često sresti kod mešovitih mreža). Parametar s bio bi za oba pomenuta voda blizak jedinici kod mnogih zemljospojeva.

Princip selektivne signalizacije preko vrednosti struja ima i taj nedostatak što se niske vrednosti s_k moraju obezbediti pri svim uklopnim stanjima mreže. Isto tako, svaka promena pomenutih parametara zahtevala bi provere i izmene podešenja relea.

Kod jednofaznih zemljospojeva na napojnim sabirnicama prekostrujni relei na vodovima ne bi reagovali, tako da ne mogu poslužiti za signalizaciju ovakvih kvarova. Zato bi se u postrojenju morala obezbediti signalizacija preko otvorenog trougla naponskih transformatora.

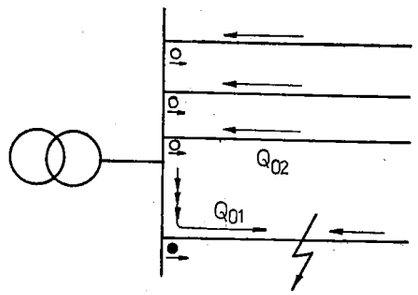
Zbog nabrojanih nedostataka, opisana tehnika otkrivanja zemljospojeva retko se primenjuje.

Otkrivanje mesta zemljospoja na osnovu smera reaktivnih snaga

Kako je pokazala analiza u 7.4.1, kao sigurni indikator voda u kvaru može poslužiti reaktivna snaga merena preko nultih komponenti napona i struja. Iz (7.45) i (7.46), naime, vidi se da je pomenuta snaga kod voda u kvaru pozitivna, a kod bilo kog ispravnog voda negativna. Pomenuta veličina, prema tome, jasno obeležava vod u kvaru i izdvaja ga od ostalih vodova.

Za merenje reaktivne snage koristi se »vatmetarski rele« sa $\sin\varphi$ spregom, na koji se dovode nulte komponente napona i struje.

U slučaju zemljospoja u mreži reagovaće samo rele na vodu koji je pogođen kvarom pošto je samo kod pomenutog voda smer reaktivne snage u skladu sa usmerenjem relea (sl. 7.15). Relei na ostalim vodovima neće zatvarati svoje kontakte budući da se u njima formiraju negativni kretni spregovi. Usmerenje relea je na sl. 7.15 naznačeno strelicama. Reagovanje relea može da bude obeleženo svetlosno ili preko signalnih znački određene boje ili u obliku zastavice.



● rele zatvara kontakte

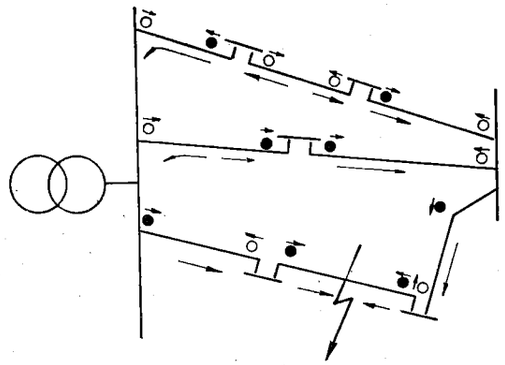
○ rele ne zatvara kontake

Sl. 7.15

Opisani princip otkrivanja mesta zemljospoja može se sa uspehom primeniti i kod petljastih mreža i kod mreža sa višestrukim napajanjem. Kod pomenutih

mreža relee za beleženje reaktivne snage treba postaviti u svakoj transformatorskoj stanici u mreži, ne samo u napojnoj, i usmeriti ka vodovima (sl. 7.16). Kako se vidi, u slučaju zemljospoja samo kod neispravnog voda doći će do delovanja relea na oba njegova kraja. Kod ispravnih vodova neće delovati rele na jednom ili oba kraja.

O položaju signalnih znački osoblje postrojenja može se obavestiti daljinskom signalizacijom ili, jednostavno, preko telefona.



Sl. 7.16

U slučaju zemljospoja na sabirnicama postrojenja, budući da registrovane reaktivne snage po svim vodovima teku ka sabirnicama, neće doći do delovanja ni jednog relea na vodovima u postrojenju. Ovako se navedeni kvar lako otkriva. Razume se, da pri tom mora da postoji neka signalizacija zemljospoja koja ukazuje da je uopšte došlo do kvara u mreži, na primer preko nulte komponente napona.

Otkrivanje mesta zemljospoja poređenjem polariteta napona i struja u prelaznom procesu

Kako je pokazano u 1.1.2, električno pražnjenje faze pogođene zemljospojem odvija se preko talasa napona i struja koji polaze od mesta kvara ka krajevima voda.

Naponski talas nultog redosleda koji polazi od mesta kvara direktno je proporcionalan vrednosti radnog napona pogođene faze neposredno pre nastanka kvara i suprotnog je polariteta (relacija 1.33 sa oznakama prema sl. 7.17)

$$u_{10} = -\frac{Z_0}{2Z_\alpha + Z_0} u_{ra}(0). \tag{7.49}$$

Polazni talas struje nultog redosleda ima vrednost

$$i_{10} = \frac{u_{10}}{Z_0} = -\frac{u_{ra}(0)}{2Z_\alpha + Z_0} \tag{7.50}$$

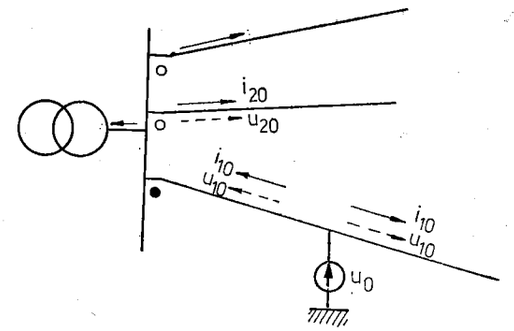
i istog je polariteta kao napon u_{10}.

Pri upadu u postrojenje, strujni i naponski talasi se prelamaju i prelaze na ispravne vodove, prostirući se od postrojenja ka drugom kraju vodova. Pri tom je

$$u_{20} = \alpha_{12} u_{10} \tag{7.51}$$

$$i_{20} = \frac{u_{10}}{Z_{02}} \tag{7.52}$$

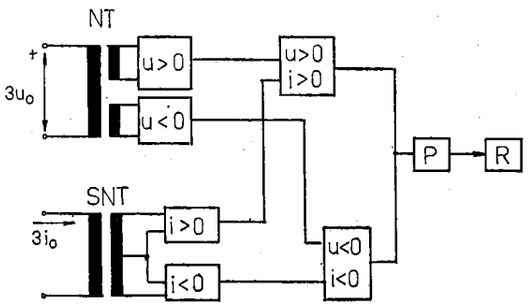
gde smo sa α_{12} označili koeficijent prelamanja za vodove 1 i 2 ($\alpha_{12} > 0$).



Sl. 7.17

U svom daljem toku talasni proces se odvija složeno preko niza odbijanja i prelamanja u postrojenjima na krajevima vodova i na mestu kvara, što je pokazano u 1.1.2.

Relacije (7.49) i (7.50) pokazuju da je prvi talas struje nultog redosleda koji u postrojenje dolazi preko neispravnog voda, istog polariteta kao i upadni naponski talas. Izrazi (7.51) i (7.52) pokazuju, međutim, da su kod ispravnih vodova, jednakog polariteta sa naponskim talasima talasi struje koji polaze od postrojenja. Drugim rečima, početni strujni talasi koji upadaju u postrojenje po pomenutim vodovima suprotnog su polariteta od talasa napona. Navedena pojava može, prema tome, da posluži za otkrivanje neispravnog voda.



Sl. 7.18

Gruba principijelna šema relejnog uređaja za otkrivanje zemljospoja po opisanom principu prikazana je na sl. 7.18 [101].

Napon $3u_0$ dovodi se na primar naponskog transformatora preko koga se napajaju blokovi za registraciju pozitivnog i negativnog polariteta ovog napona. Transformatorom SNT struja $3i_0$ pretvara se u proporcionalne napone koji se takođe dovode na odgovarajuće logičke blokove za utvrđivanje polariteta. Blokovi su izrađeni tako da reaguju samo na prve dobijene vrednosti pa dalji tok procesa u mreži ne utiče na njihovo pokazivanje.

Izlaz iz blokova dovodi se u komparatore polariteta koji, u slučaju jednakosti polariteta, preko pojačivača P aktiviraju signalni rele R.

Opisana metoda omogućava selektivno registrovanje i prolaznih zemljospojeva što se, ako su ovi kratkotrajni, ne može postići merenjem struje odnosno reaktivne snage.

Opisani uređaj treba da bude izveden tako da ispravno reaguje i kod vrlo malih vrednosti napona koje se imaju kada do kvara dođe u blizini nultih vrednosti radnog napona pogođene faze. Uređaj istovremeno mora da bude neosetljiv na procese koji nastupaju pri različitim manipulacijama u mreži kod kojih dolazi do sličnih pojava kao kod zemljospojeva.

7.4.4. IZBOR SIGNALIZACIJE I ZAŠTITE

U 7.4.2 i 7.4.3 dat je pregled mogućih postupaka za otkrivanje mesta zemljospoja u izolovanim mrežama koji se mogu primeniti ili samo za signalizaciju ili za neposredno automatsko isključenje.

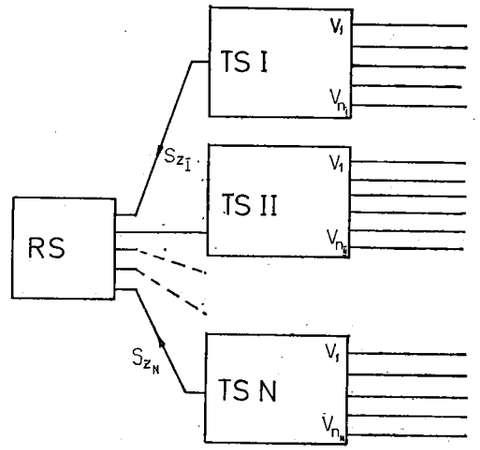
Da bi se sačuvalo osnovno pozitivno svojstvo izolovane mreže — plansko isključenje zemljospoja u najpovoljnijem trenutku za potrošače i uz prethodne pripreme za rezervno napajanje, obično se prednost u praksi daje signalizaciji zemljospoja sve dok je ovo rešenje tehnički moguće.

Primena jednostavne signalizacije preko napona, opisane u 7.4.2 može se smatrati opravdanom u mrežama sa malim strujama zemljospoja, kakve su prvenstveno vazdušne mreže. Kod pomenutih mreža najveći broj jednofaznih zemljospojeva je prolaznog karaktera, a dosta su retki slučajevi prelaska zemljospojeva u kratak spoj na mestu kvara. Ako su, pri tom, razmatrane mreže relativno manje prostornosti tako da je mala verovatnoća dvostrukih zemljospojeva, ili su kod prijemnih transformatorskih stanica bezbedno odvojena uzemljenja visokog i niskog napona (Odeljak 6.7), zemljospojevi se ne moraju odmah odstraniti.

Kod gradskih i industrijskih mreža koje imaju znatnu instalisanu snagu i potrošače osetljive na prekide pogona, treba težiti selektivnoj signalizaciji prema reaktivnoj snazi ili polaritetu napona i struja. Radi smanjivanja ukupnog vremena rada sa jednofaznim zemljospojem poželjno je pri tom uvesti daljinsku signalizaciju zemljospoja u mrežama, kako bi se o kvaru odmah obavestile dispečerske i remontne službe koje su inače zajedničke za više mreža. Moguća organizaciona šema signalizacije kod radijalnih mreža prikazana je na sl. 7.19.

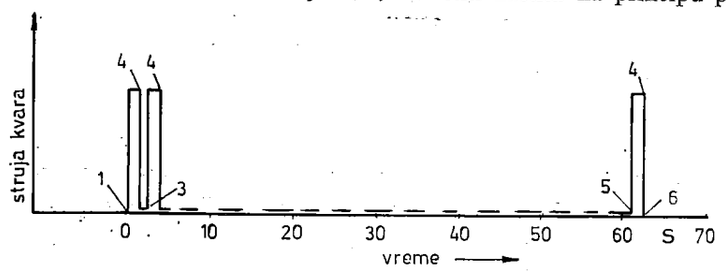
Signal o nastanku zemljospoja u određenoj mreži šalje se iz napojne transformatorske stanice TS u remontnu službu RS, predviđenu za opsluživanje razmatrane grupe mreža. Po dobitku signala remontna ekipa odlazi u napojnu TS koja je poslala signal i na osnovu pokazivanja postojećih relejnih uređaja utvrđuje na kom je vodu kvar. Probnim isključivanjem delova voda nalazi se koja je deonica voda u kvaru. Ova se deonica isključuje iz pogona a ispravni delovi voda uključuju se u posmatranu i susedne mreže.

Opisani principi za otkrivanje jednofaznog zemljospoja mogu se koristiti i u slučajevima kada se želi automatsko brzo isključivanje zemljospoja — »zemljospojna zaštita«. Kod radijalnih mreža dolazi u obzir, pored tehnike sa tragačem



Sl. 7.19

kvara opisane u 7.4.2, primena metoda, bilo na osnovu reaktivnih snaga, bilo na osnovu polariteta napona i struja. Kod petljastih i višestrano napajanih mreža može se sa uspehom, u svim slučajevima, koristiti zaštita na principu poređenja



Sl. 7.20

polariteta, pošto se talasni procesi na krajevima neispravnih vodova odvijaju na opisani karakteristični način nezavisno od konfiguracije mreže. Pomenuta zaštita je dosta osetljiva pošto je sastavljena od statičkih elemenata i zahteva pažljivo

održavanje i podešavanje. Kod zaštite na osnovu tokova reaktivne snage u petljastim mrežama trebalo bi obezbediti automatsko poređenje signala zemljospoja na krajevima vodova, što stvara velike praktične teškoće.

Zbog velikog procenta prolaznih zemljospojeva kod vazdušnih se vodova često primenjuje isključenje sa automatskim ponovnim uključenjima (APU). Na sl. 7.20 prikazan je, primera radi, dijagram ciklusa operacija prekidača sa APU koji se koriste u vazdušnim mrežama Italije [28]. Pomenute mreže su radijalne i rade sa izolovanom neutralnom tačkom. Značenje oznaka je sledeće:

1 nastanak kvara

3 brzo ponovno uključenje

4 isključenje

5 sporo ponovno uključenje

6 definitivno isključenje

Kako se vidi, navedenim ciklusom operacija predviđena je jedna kratka beznaponska pauza reda 0,1 do 0,3 s i, u slučaju bezuspešnog prvog ponovnog uključenja, druga pauza duga oko 1 min. Ako kvar ni u toku ove pauze nije sam od sebe iščezao, vod se definitivno isključuje.

Primenom opisane tehnike isključivanja mogu se eliminisati prolazni i privremeni kvarovi, bez trajnog prekida pogona. Ona, međutim, zahteva posebno atestirane prekidače i ugradnju odgovarajućih uređaja za komandu prekidača, što postrojenja čini skupljim i složenijim.

7.5. KOMPENZOVANA MREŽA

7.5.1. KARAKTERISTIČNE VELIČINE

Kompenzaciona prigušnica suprotstavlja proticanju struje impedansu

$$\underline{Z}_N=\underline{Z}_p=R_p+j\,X_p,$$

saglasno (4.1).

Ako se smatra da je

$$R\ll Z_p, \tag{7.53}$$

što je u praktičnim uslovima po pravilu slučaj, za trostruku nultu komponentu napona na sabirnicama napojnog transformatora dobija se, s obzirom na (7.5),

$$3\,\underline{U}_{so}=-3\,U_{nf}. \tag{7.54}$$

Struja $3\,\underline{I}_{10}$ biće, saglasno (7.53) i (7.7),

$$3\,\underline{I}_{10}=U_{nf}\left[\frac{1}{\underline{Z}_p}+3\,(\underline{Y}-\underline{Y}_1)\right]. \tag{7.55}$$

Ako označimo

$$\underline{Y}=G+j\,\omega\,C,\quad \underline{Y}_1=G_1+j\,\omega\,C_1 \tag{7.56}$$

iz (7.55) se dobija, kada se ima u vidu (4.8),

$$3\,\underline{I}_{10}=U_{nf}\left\{\frac{R_p}{X_p^2}+3\,(G-G_1)-j\left[\frac{1}{X_p}-3\,\omega\,(C-C_1)\right]\right\}. \tag{7.57}$$

Kada je kompenzacija tačno podešena ima se

$$\frac{1}{X_p}=3\,\omega\,C,$$

tako da (7.57) postaje

$$3\,\underline{I}_{10}=U_{nf}\left[\frac{R_p}{X_p^2}+3\,(G-G_1)-j\,3\,\omega\,C_1\right]. \tag{7.58}$$

Prema (7.9) i (7.53), za nulte komponente struja po ispravnom vodu dobija se

$$3\,\underline{I}_{20}=U_{nf}\;3\,\underline{Y}_2=U_{nf}\,(3\,G_2+j\;3\,\omega\,C_2). \tag{7.59}$$

Aktivna i reaktivna snaga za nulte komponente neispravnog voda jednake su, s obzirom na (7.54) i (7.57),

$$P_{10}=R_e\{3\,\underline{U}_{s0}\,3\,\underline{I}_{10}{}^*\}=-3\,U_{nf}{}^2\left[\frac{R_p}{X_p^2}+3(G-G_1)\right] \tag{7.60}$$

i

$$Q_{10}=I_m\{3\,\underline{U}_{so}\,3\,\underline{I}_{10}{}^*\}=-3\,U_{nf}{}^2\left[\frac{1}{X_p}-3\,\omega\,(C-C_1)\right]. \tag{7.61}$$

Odgovarajuće snage za ispravan vod iznose, saglasno (7.54) i (7.59), vodeći računa o smeru struje $\underline{I}_{20}$,

$$P_{20}=R_e\{3\,\underline{U}_{so}\,(-3\,\underline{I}_{20}{}^*)\}=9\,U_{nf}{}^2\,G_2 \tag{7.62}$$

$$Q_{20}=I_m\{3\,\underline{U}_{so}\,(-3\,\underline{I}_{20}{}^*)\}=-9\,U_{nf}{}^2\,\omega\,C_2 \tag{7.63}$$

7.5.2. SIGNALIZACIJA I ZAŠTITA

Za neselektivnu signalizaciju zemljospoja može se, kako pokazuje (7.54) isto kao kod mreža sa izolovanom neutralnom tačkom, koristiti napon na krajevima otvorenog trougla merne grupe naponskih transformatora. Takođe se može za automatsko isključenje voda u kvaru, kod radijalnih mreža, primeniti manipulaciona tehnika i automatika opisana u 7.4.2, sa istim prednostima i manama.

Za otkrivanje mesta kvara u kompenzovanim mrežama sa uspehom se primenjuje metod poređenja polariteta početnih vrednosti napona i struja, objašnjena u 7.4.3. Kompenzaciona prigušnica, kao što je poznato (Tačka 1.1.2), ne utiče praktično na tok razmatranih talasnih procesa i ovi se odvijaju u svemu kao kod izolovanih mreža, tako da na osnovu svojih karakterističnih svojstava omogućavaju razlikovanje ispravnih i neispravnih vodova.

Kako se može videti iz izraza izvedenih u 7.5.1, struje neispravnog i ispravnog voda ne razlikuju se međusobno po efektivnim vrednostima, tako da ne mogu poslužiti kao merilo za otkrivanje voda u kvaru. Takođe se uočava da se ne razlikuju bitno po vrednosti ni reaktivne snage merene u nultom redosledu. Pri tom treba imati u vidu da se, ako je $X_p > 3\,\omega\,(C - C_1)$, što zavisi od trenutnog uklopnog stanja mreže, pomenute snage ne razlikuju ni po znaku. Iz navedenog se zaključuje da, kod kompenzovanih mreža, reaktivne snage u nultom redosledu takođe ne mogu biti pouzdani indikator za otkrivanje neispravnih vodova.

Pored poređenja polariteta nultih napona i struja u kompenzovanim mrežama se za selektivnu signalizaciju ili isključenje jednofaznih zemljospojeva mogu koristiti i pojedine druge metode, sa manje ili više uspeha. U narednim izlaganjima biće dat kratak opis pomenutih metoda.

Otkrivanje mesta kvara prema smeru aktivnih snaga

Aktivna komponenta struje za vod u kvaru jednaka je, saglasno (7.57),

$$R_e\{3\,\underline{I}_{10}\} = \left[\frac{R_p}{X_p^2} + 3(G - G_1)\right] U_{nf}. \tag{7.64}$$

Pomenuta komponenta za ispravan vod iznosi, prema (7.59),

$$R_e\{3\,\underline{I}_{20}\} = 3\,G_2\,U_{nf}. \tag{7.65}$$

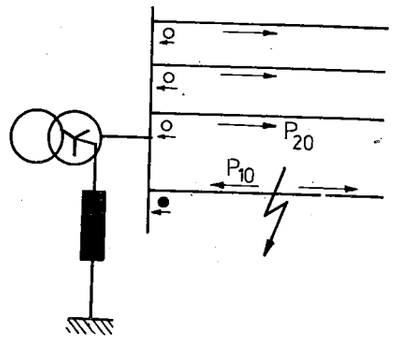
Pošto odnos odvodnosti $\frac{G - G_1}{G_2}$ odgovara približno odnosu kapaciteta odgovarajućih delova mreže, može se zaključiti da se, grubo, aktivne komponente struja zemljospoja kod kompenzovanih mreža raspoređuju kao struje zemljospoja kod izolovanih mreža. Zbog uticaja gubitaka u prigušnici odnos struja kroz neispravan vod prema struji kroz ispravan vod je, za aktivne komponente, još i veći od odgovarajućeg odnosa za ukupne struje kod izolovanih mreža. Izvedena analiza pokazuje da vrednosti aktivnih komponenti struje mogu poslužiti kao kriterijum za otkrivanje neispravnog voda.

Potpuna selektivnost relejnih uređaja u svim slučajevima postiže se ako se u postrojenja ugrade vatmetarski relei koji reaguju samo kada aktivna snaga registrovanja u nultom redosledu teče od voda ka postrojenju (sl. 7.21). Relei na ispravnim vodovima konstatuju snagu koja teče od postrojenja ka vodu, tako da neće zatvoriti svoje kontakte (relacije (7.60) i (7.62)).

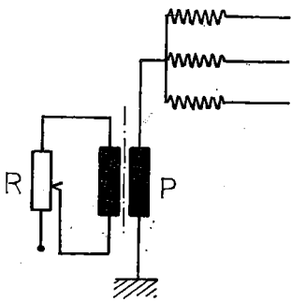
Opisani princip zaštite može se primeniti i kod petljastih i višestrano napajanih mreža.

Izrazi (7.62) i (7.63) pokazuju da je reaktivna snaga koja se registruje kod ispravnih vodova znatno veća od aktivne snage. Vatmetarski rele smera, prema tome, mora da registruje pravilno aktivne snage pri vrlo malom faktoru snage. Ovo zahteva veliku tačnost, kako samog relejnog uređaja, tako i mernih transformatora koji moraju da imaju male »ugaone greške« (greške u transformaciji faznog stava primarnih veličina), kako ne bi prouzrokovali delovanje relea. S druge strane, struja voda u kvaru po pravilu sadrži osetan procenat viših harmonika čije vrednosti nisu zanemarljive u odnosu na merenu aktivnu komponentu struje, što takođe može da utiče na ispravnost pokazivanja vatmetarskog relea, posebno ako je ovo indukcionog tipa.

Iz navednih razloga, opisani princip otkrivanja kvara, iako se vršlo često primenjuje zbog relativne jednostavnosti pri izvođenju i održavanju i niskih cena, ne može se smatrati sasvim pouzdanim, posebno kod prostranijih i petljastih mreža [38, 50].



Sl 7.21

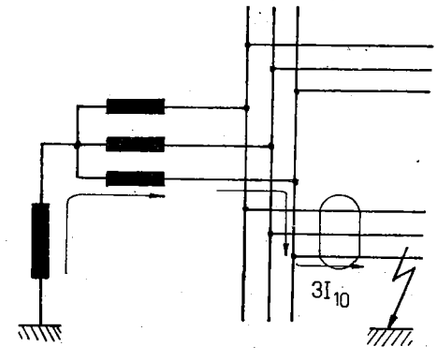


Sl. 7.22

Da bi se povećala aktivna komponenta struje neispravnog voda i tako neutralisao uticaj viših harmonika, može se povećati aktivna otpornost prigušnice. Ovo se može postići ako se prigušnica izvede sa sekundarnim namotajem, koji se opterećuje podesnim otpornikom (sl. 7.22). Pomenuto rešenje poskupljuje postrojenja i čini ih složenijim za izvođenje, održavanje i eksploataciju.

Otkrivanje mesta kvara prema struji prigušnice u prelaznom procesu

U prelaznom procesu do uspostavljanja stacionarnog stanja mreže sa zemljospojem, iz prigušnice će ka mestu kvara poteći induktivna struja, 50 Hz, koja je nekoliko puta veća od radne struje prigušnice (Odeljak 4.2). Budući da pomenuta struja prolazi samo po fazi voda koja je pogođena kvarom, ova će struja biti registrovana kao nulta, preko postojećih strujnih transformatora (sl. 7.23). Struja



Sl. 7.23

prigušnice protiče samo po vodu koji je u kvaru, tako da na ispravnim vodovima neće postojati. Ovo omogućava nalaženje neispravnog voda.

Pošto se vod u kvaru otkriva preko struja koje u prelaznom procesu teku u mesto kvara od prigušnica, opisana metoda zahteva da prigušnica bude postavljena u napojnoj transformatorskoj stanici. Ovo stvara znatne praktične teškoće u mrežama sa velikim kapacitivnim strujama zemljospoja, gde je povoljnije kompenzacione prigušnice rasporediti u više tačaka mreže.

Otkrivanje mesta kvara na osnovu viših harmonika struje

Raspodela harmonika struje koji u normalnom pogonu obrazuju simetričan direktni ili inverzni sistem u slučaju zemljospoja može se ustanoviti na osnovu istih opštih relacija kao i za osnovni harmonik, što je pokazano u 4.1.3. U formulama u 7.5.1 treba samo na mesto napona U_{nf} uvrstiti napon odgovarajućeg harmonika koji u normalnom pogonu postoji na prvoj fazi, označimo ga sa $U_r^{(k)}$, i za kružnu učestanost uvrstiti $k\omega$.

Tako se za k-ti harmonik struje kroz vod u kvaru dobija

$$3\,\underline{I}_{10}^{(k)} = U_r^{(k)}\left\{\frac{R_p}{X_p^2 k^2} + 3\,(G - G_1) - j\left[\frac{1}{X_p k} - 3\,k\omega\,(C - C_1)\right]\right\} \tag{7.66}$$

a za ispravan vod

$$3\,\underline{I}_{20}^{(k)} = U_r^{(k)}\,(3\,G_2 + j\,3\,k\omega\,C_2), \tag{7.67}$$

saglasno (7.57) i (7.59).

Isto će tako biti, u skladu sa (7.54),

$$3\,U_{so}^{(k)} = -\,3\,U_r^{(k)}. \tag{7.68}$$

Budući da je prigušnica podešena da kompenzuje osnovni harmonik kapacitivne struje mreže, kod k-tog harmonika pomenute struje u (7.57) će se imati

$$\frac{1}{X_p k} \ll 3\,k\omega\,(C - C_1)$$

i ovaj će harmonik biti praktično kapacitivnog karaktera

$$3\,\underline{I}_{10}^{(k)} \approx U_r^{(k)}\,j\,3\,k\omega\,(C - C_1). \tag{7.69}$$

Takođe se i u (7.67), zbog neznatnog udela aktivne komponente, može pisati

$$3\,\underline{I}_{20}^{(k)} \approx U_r^{(k)}\,j\,3\,k\omega\,C_2. \tag{7.70}$$

Relacije (7.69) i (7.70) pokazuju da posmatrani harmonici struje u neispravnom i ispravnom vodu stoje u istom odnosu kao osnovni harmonici odgovarajućih struja kod mreža sa izolovanom neutralnom tačkom i da, uz ista ograničenja, mogu poslužiti za otkrivanje neispravnog voda.

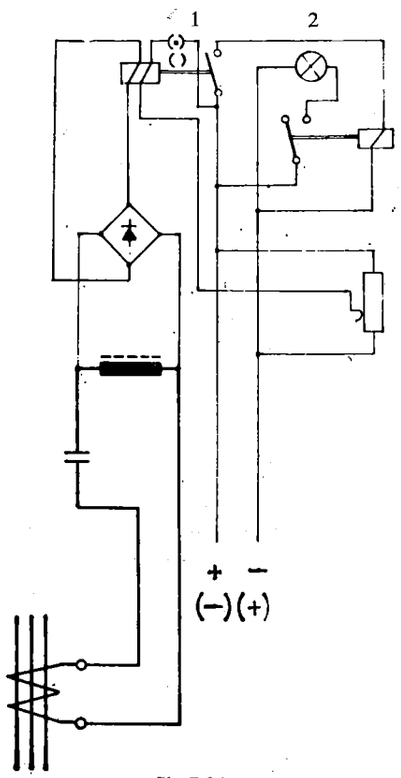
Postupak za utvrđivanje voda u kvaru sastoji se u tome što se odgovarajućim mernim uređajem, koji se priključuje na strujne transformatore vodova tako da meri nultu komponentu struja, utvrđuje sadržaj viših harmonika u ovoj struji. Vod sa najvećim sadržajem viših harmonika biće po pravilu vod u kvaru, kako sledi i iz (7.69) i (7.70).

Kao merodavna veličina za poređenje vodova može se izabrati [77]:

— efektivna vrednost grupe viših harmonika u nultoj komponenti struje,
— reaktivna snaga određenog harmonika u nultom redosledu,
— odnos efektivnih vrednosti viših harmonika nulte komponente struje prema efektivnoj vrednosti osnovnog harmonika nulte komponente struje,
— suma efektivnih vrednosti viših harmonika nulte komponente struje i dr.

Na sl. 7.24 prikazana je šema uređaja za merenje viših harmonika [50], koja približno spada u prvu od navedenih vrsta uređaja.

Na krajeve obuhvatnog strujnog transformatora vezuje se redno L, C kolo sa rezonantnom učestanošću 250 Hz. Napon na induktivitetu usmerava se i koristi za aktiviranje kontakta 1 koji zatvara kontakt 2 i uzrokuje signal jednofaznog zemljospoja. Na kalemu kontakta 1 postoji dodatni pomoćni namotaj preko koga se može podešavati napon reagovanja pomenutog kontakta. Kako se vidi, u šemi se favorizuje peti harmonik pri kome dolazi do rezonanse ugrađenog oscilatornog kola, ali se šemom ne zaprečavaju sasvim ni sedmi i deveti harmonik.



Sl. 7.24

Selektivno otkrivanje mesta kvara u svim uslovima, pa i kod petljastih višestrano napajanih mreža, omogućava jedino primena mernih uređaja koji reaguju na smer reaktivne snage određenog harmonika, na primer petog [102]. Princip traženja kvara kod pomenute metode odgovara u svemu onom objašnjenom u 7.4.3, koji se odnosi na izolovane mreže i reaktivne snage osnovnog harmonika.

Ostali principi za otkrivanje neispravnih vodova mogu se sa uspehom primenjivati kod radijalnih mreža, naročito onih sa većim brojem vodova i većim brojem prijemnih transformatora, pošto su ovi sami po sebi, a i zbog uticaja potrošača, značajni izvori viših harmonika.

Određene teškoće kod praktične primene metoda koje se osnivaju na višim harmonicima mogu se pojaviti zbog nestalnosti iznosa viših harmonika u toku dana i specifičnosti pojedinih mreža u pogledu intenziteta i raspodele izvora pojedinih harmonika. Zato je potrebno prilagođavanje mernih uređaja osobenostima različitih mreža i naknadno podešavanje prema pogonskim iskustvima.

Kratkotrajno premoščenje prigušnice malom impedansom

Ako se pri pojavi trajnog zemljospoja kompenzaciona prigušnica premosti paralelnim vezivanjem male reaktanse ili otpornosti, struja zemljospoja u neisprav-

nom vodu naglo će porasti i vod se može isključiti primenom jednostavne prekostrujne zaštite. Pomenutim rešenjem, kompenzovana mreža se, pri eliminaciji zemljospojeva, prevodi u mrežu uzemljenu preko male impedanse o kojoj će biti reči u narednom odeljku.

7.6. MREŽA UZEMLJENA PREKO MALE IMPEDANSE

7.6.1. KARAKTERISTIČNE VELIČINE MREŽE PRI ZEMLJOSPOJU

Kod mreža uzemljenih preko male impedanse je po pravilu

$$3\,\underline{Y}Z_N \ll 1, \tag{7.71}$$

tako da odgovarajući izrazi za karakteristične napone i struje dobijaju jednostavan oblik.

Iz formule (7.5) se, s obzirom na (7.71), dobija

$$3\,\underline{U}_{so} = -U_{nf}\frac{3\,\underline{Z}_N}{\underline{Z}_N+R}. \tag{7.72}$$

Ako je

$$R \ll Z_N, \tag{7.73}$$

što je dosta čest slučaj, posebno kod kablovskih mreža (Odeljak 7.2), iz (7.72) sledi

$$3\,\underline{U}_{so} = -3\,U_{nf}. \tag{7.74}$$

Struja koja teče ka mestu kvara po neispravnom vodu može se, saglasno (7.7) i (7.71), izračunati iz izraza

$$3\,\underline{I}_{10} = \frac{U_{nf}}{\underline{Z}_N+R} \tag{7.75}$$

ili, ako je zadovoljen uslov (7.73),

$$3\,\underline{I}_{10} = \frac{U_{nf}}{\underline{Z}_N}. \tag{7.76}$$

Formule (7.75) i (7.76) odnose se na slučaj kada je do zemljospoja došlo na početku voda, u blizini napojnih sabirnica. Kod kvarova na vodu udaljenih od pomenutih sabirnica razmatrana struja bi bila manja zbog uticaja impedansi voda i njena se vrednost izračunava prema izrazu

$$3\,I_{10\,v} = \mu\,3\,I_{10}, \tag{7.77}$$

saglasno (5.10), gde se parametar μ određuje prema dužini voda do mesta kvara.

Struja koja teče sa strane ispravnog voda ka napojnim sabirnicama jednaka je, s obzirom na (7.9) i (7.71),

$$3\,\underline{I}_{20} = U_{nf}\frac{3\,\underline{Y}_2\,\underline{Z}_N}{\underline{Z}_N+R} \tag{7.78}$$

odnosno, ako važi (7.73),

$$3\,\underline{I}_{20} = 3\,\underline{Y}_2\,U_{nf}. \tag{7.79}$$

Struja kroz impedansu za uzemljenje jednaka je, na osnovu (7.10) i (7.71),

$$\underline{I}_N = \frac{U_{nf}}{\underline{Z}_N+R} \tag{7.80}$$

ili, ako važi (7.73),

$$\underline{I}_N = \frac{U_{nf}}{\underline{Z}_N}. \tag{7.81}$$

Kako se vidi, struja kroz impedansu za uzemljenje jednaka je struji I_{10}, kada se zanemari uticaj nultih admitansi vodova s obzirom na (7.71). Kod kvarova na vodu pomenuta struja može se stoga takođe računati prema (7.77).

7.6.2. VRSTE ZAŠTITE OD ZEMLJOSPOJA

Kako se vidi iz (7.75) do (7.77), struja u neispravnom vodu može da bude znatna, zavisno od izbora vrednosti impedanse za uzemljenje. Obično se pomenuta impedansa bira tako da struja $3\,I_{10}$ kod kvara na napojnim sabirnicama, bez prelazne otpornosti, leži u opsegu od 300 A do 1500 A, a ponekad se usvajaju i još veće vrednosti.

Usled velikih vrednosti struja, jednofazni zemljospojevi u mrežama uzemljenim preko male impedanse moraju se odmah isključiti da bi se izbegla termička oštećenja elemenata mreže. U razmatranim mrežama dolazi, prema tome, u obzir isključivo primena zemljospojne zaštite koja treba da bude tako koncipirana da deluje automatski, brzo i selektivno.

Prekostrujna zaštita koja reaguje na nulte komponente struja

Kako izraz (7.79) pokazuje, struja $3\,I_{20}$, kada je R zanemarljivo, ima jednaku vrednost kao kod izolovane mreže i iznosi po pravilu najviše oko par desetina ampera. Pomenuta struja znatno je, znači, manja od struje $3\,I_{10}$ i ova razlika pruža pouzdanu osnovu za otkrivanje i automatsko isključivanje neispravnog voda.

Kod radijalnih mreža selektivnost zaštite se može postići primenom običnih prekostrujnih relea uključenih u sekundarna kola strujnih transformatora tako da registruju trostruke nulte komponente struja u vodovima (Tačka 7.4.3).

Struja reagovanja relea treba da bude manja od najmanje vrednosti koju može da ima struja jednofaznog zemljospoja kod kvara na odgovarajućem vodu. U praktičnim proračunima čini se razumnim da se kao najmanja usvaja ona vrednost struje kvara koja se ima kod zemljospoja na drugom kraju voda računato od napojne TS, uz pretpostavku da je prelazna otpornost na mestu kvara zanemarljiva. Navedena vrednost jednaka je, saglasno (7.77)

$$I_{\min} = \mu_{\max}\frac{U_{nf}}{Z_N}, \tag{7.82}$$

gde se $\mu_{\max}$ određuje za celu dužinu voda.

Razmatrani rele ne sme da da signal za isključenje kada je štićeni vod ispravan.

Kod zemljospoja u mreži, kroz vod 1, ako je ovaj ispravan, poteći će u prelaznom procesu struja koja se, u skladu sa (7.79), može proceniti prema izrazu

$$I_{\max} = k\, 3\, Y_1\, U_{nf}. \tag{7.83}$$

Koeficijentom k obuhvata se uticaj jednosmerne komponente. Može se smatrati da je po pravilu $k<2$. Struja $I_{\max}$ može da dovede do trenutnog reagovanja prekostrujnog organa ako je ovaj nisko podešen. Kada zaštita ima vremensko zatezanje, što je obično slučaj, neće doći do delovanja zaštite ni u razmatranim okolnostima ako je struja otpuštanja relea veća od stacionarne vrednosti struje ispravnog voda

$$I_0 > 3\, Y_1\, U_{nf}. \tag{7.84}$$

Između struje reagovanja i struje otpuštanja relea postoji odnos

$$I_0 = \frac{1}{k_0} I_R, \tag{7.85}$$

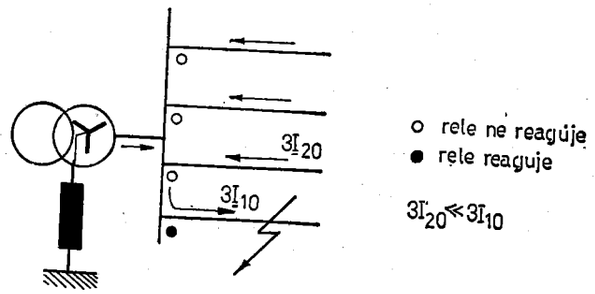
gde je sa k_0 označen koeficijent otpuštanja, koji predstavlja karakterističan parametar za određeni tip relea.

Na osnovu (7.82), (7.84) i (7.85) dolazi se do sledećeg kriterijuma za izbor strujnog podešenja relea za vod 1

$$k_0\, 3\, Y_1\, U_{nf} < I_R < \mu_{\max} \frac{U_{nf}}{Z_N}. \tag{7.86}$$

Da bi se zaštitom obuhvatili i pojedini zemljospojevi sa prelaznom otpornošću na mestu kvara, u okviru opsega (7.86) treba se opredeljivati za što je manje moguće struje reagovanja. Ograničavajuće faktore u ovom smislu mogu predstavljati odnosi preobražaja strujnih transformatora i moguće vrednosti strujnog podešenja relea.

Ako se relei za sve vodove mreže podese u skladu sa (7.86), kod nastanka zemljospoja reagovaće samo rele neispravnog voda i kvar će se selektivno automatski isključiti (sl. 7.25).

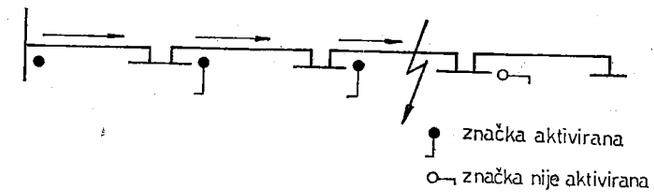


Sl. 7.25

Radi bržeg nalaženja deonice voda koja je u kvaru, u radijalnim mrežama može se koristiti dodatna signalizacija zemljospoja. U prijemnim transformatorskim

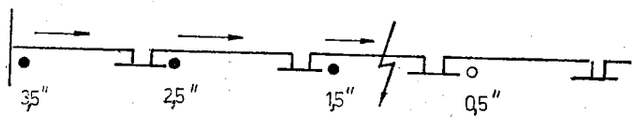
stranicama ugrađuju se strujni transformatori za merenje nulte komponente struje i relei koji signaliziraju ako je kroz odgovarajuću deonicu voda protekla struja zemljospoja (sl. 7.26). Signal je obično vizuelan, preko znački odgovarajućih boja ili zastavica, koje se mogu postaviti tako da se vide spolja, bez ulaska u transformatorsku stanicu. Deonica u kvaru je ona koja se nalazi između TS sa aktiviranim i neaktiviranim pokazivačem zemljospoja. Posle ponovnog stavljanja voda pod napon, pošto je kvar uklonjen, signalni relei automatski vraćaju značke u početni položaj.

Signali zemljospoja mogu se prenositi i daljinski u odgovarajuću remontnu ili dispečersku službu, čime se vreme otklanjanja kvara još više skraćuje.



Sl. 7.26

Automatsko isključenje neispravne deonice postiže se vremenskim stepenovanjem zemljospojne zaštite. U svaku prijemnu transformatorsku stanicu ugrađuje se prekostrujni rele i prekidač ili rastavljač snage koje pomenuti rele aktivira. Prekostrujni relei imaju vremenske organe kojima se podešava vreme reagovanja. Vremena reagovanja biraju se tako da rastu od kraja ka početku voda, obično u stepenima ne manjim 0,5 s, kako bi se izbegla pogrešna reagovanja usled nesavršenosti satnih mehanizama. Ovakvim se rešenjem izbegava isključenje ispravnih deonica voda od izvorne TS do mesta kvara. Posle isključenja neispravne deonice, ispravni deo voda nastavlja normalni pogon (sl. 7.27).

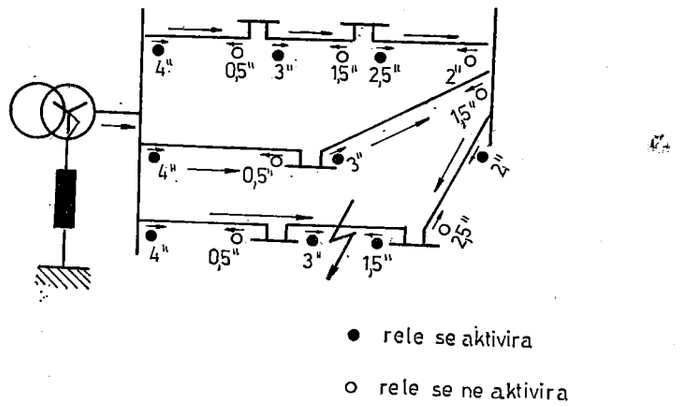


Sl. 7.27

Primena oba opisana rešenja zahteva povećane investicije zbog potrebe ugradnje strujnih transformatora, signalnih relea i automatskih prekidača ili rastavljača snage u svaku prijemnu TS, kao i uvođenja daljinske signalizacije. Takođe postaje složenije i izvođenje i održavanje mreže, a izvesne praktične teškoće mogu da nastanu i s obzirom na mogućnost otkaza i kvarova pojedinih elemenata zaštite i automatike.

Selektivno isključenje jednofaznog zemljospoja u petljastoj mreži može se ostvariti primenom prekostrujne zaštite podešene na nultu komponentu struja kvara, ako se ova dopuni, pored vremenskog i usmerenim organom. Usmereni organi treba da su tako orijentisani da zatvaraju svoje kontakte kada struja kvara teče ka štićenoj deonici. U slučaju uzemljenja preko otpornika pomenuti organi podešavaju se prema aktivnim snagama, a u slučaju uzemljenja preko induktivne

prigušnice, prema reaktivnim snagama. Vremenski organi podešavaju se tako da relei koji su najudaljeniji od izvora napajanja u lancu isto usmerenih relea imaju najkraća vemena, a ostali relei u lancu — duža vremena što su bliži izvoru.



Sl. 7.28

Na sl. 7.28 prikazan je način podešenja zemljospojne zaštite na primeru jednostrano napajane petljaste mreže. Pretpostavljeni kvar isključio bi se prvo na strani relea podešenog na 1,5″, čime bi se sprečilo reagovanje zaštite ispred pomenutog relea, računajući prema toku struje kvara. Posle 3″ reagovala bi zaštita i na drugom kraju neispravne deonice. Posle isključenja neispravne deonice mreža bi nastavila normalni pogon.

Prekostrujna zaštita koja reaguje na fazne struje

Za isključivanje zemljospojeva u mrežama uzemljenim preko male impedanse može se primeniti i zaštita koja reaguje, ne na nulte komponente, već na fazne struje. Kod ovog rešenja u postrojenja se ugrađuju trofazni prekostrujni relei koji se napajaju sa sve tri fazne struje preko odgovarajućih strujnih transformatora i služe za zaštitu od svih vrsta kratkih spojeva.

Struju reagovanja pomenute zaštite treba izabrati tako da bude veća od radnih struja za bar par desetina procenata, kako ne bi došlo do neželjenog aktiviranja kod većih opterećenja. Istovremeno, saglasno opštem kriterijumu (7.86), pomenuta struja mora da bude manja od struje jednofaznog zemljospoja na najudaljenijem kraju voda.

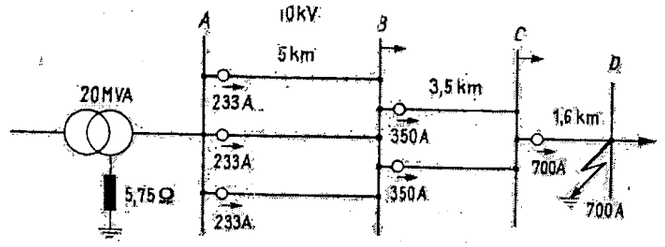
Kriterijum za strujno podešenje zaštite bio bi

$$k_r I_{rm} \leqslant I_R < \mu_{\max} \frac{U_{nf}}{Z_N} \tag{7.87}$$

U (7.87) sa I_{rm} označena je maksimalna radna struja voda a sa k_r sačinilac rezerve kojim se obezbeđuje da ne dođe do nepoželjnog reagovanja relea usled netačnosti mernog organa, kao i eventualnih prekoračenja procenjenih vrednosti I_{rm}. Obično se može usvojiti $k_r \approx 1{,}2$.

Kako se vidi iz (7.87), razmatrana zaštita zahteva da struje zemljospoja budu dosta veće od maksimalnih radnih struja vodova. Ovo, po pravilu, dovodi do potrebe da se usvajaju male vrednosti impedanse uzemljenja, što inače može da bude nepovoljno za određenu mrežu u pogledu dimenzionisanja uzemljenja i uticaja na telekomunikacione vodove.

Izvesne teškoće sa faznom zaštitom mogu se imati čak i kod dosta malih impedansi uzemljenja. Kao dobar primer može poslužiti mreža 10 kV, prikazana na sl. 7.29 [38]. Mreža je radijalna, jednostrano napajana, sa neutralnom tačkom uzemljenom preko reaktanse 5,75 Ω, kojoj odgovaraju struje jednofaznog zemljospoja reda 1000 A kod kvarova na napojnim sabirnicama. Kablovi su preseka 3×185 mm² sa provodnicima od bakra. Maksimalne radne struje su za sve kablove 400 A. U mreži je primenjena prekostrujna fazna zaštita sa vremenskim stepenovanjem. Struja reagovanja zaštite je kod svih kablova podešena na vrednost 480 A.



Sl. 7.29

Kod jednofaznog zemljospoja na sabirnicama *D* struja kvara će iznositi približno 700 A, zbog uticaja impedansi kablova. Pomenuta struja će svakako aktivirati rele u postrojenju *C*. Kako se, međutim, vidi sa sl. 7.29, struja koja protiče kroz paralelne vodove koji polaze iz postrojenja *B* i *A*, nije dovoljna za aktiviranje zaštite u ovim postrojenjima. U slučaju otkaza relea ili prekidača u postrojenju *C*, ostala zaštita na vodu ne bi reagovala i cela bi se mreža morala isključiti rezervnom zemljospojnom zaštitom u napojnoj transformatorskoj stanici.

Kod zemljospoja na sabirnicama postrojenja *C* struja kvara iznosila bi oko 800 A, što bi opet bilo nedovoljno za reagovanje zaštite vodova u postrojenjima *B* i *A*. U ovim bi postrojenjima zato bila neophodna primena posebne »podimpedantne« zaštite, koja bi bila podešena tako da reaguje na struje manje od maksimalnih radnih struja kablova ako je napon faze pao osetno ispod nazivne vrednosti [38, 27]. Ovo svakako zaštitu čini dosta složenijom.

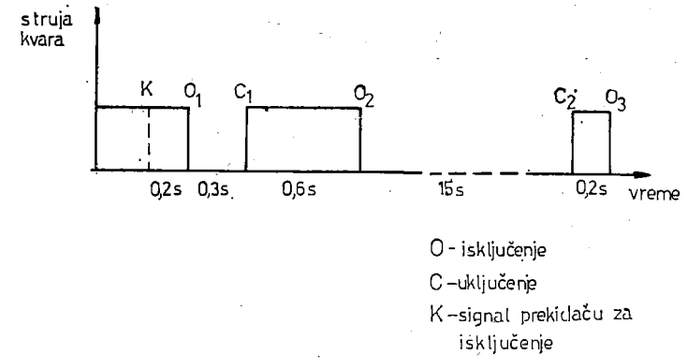
Automatsko ponovno uključenje i zemljospojni prekidač

Zbog velikog broja prolaznih jednofaznih zemljospojeva kod vazdušnih vodova je često ekonomski opravdana primena automatskog ponovnog uključenja (APU), o kome je već i ranije bilo reči u 7.4.4.

Na sl. 7.30 prikazan je dijagram operacija prekidača koji se koristi za eliminaciju zemljospojeva u vazdušnim mrežama Francuske, kao tipsko rešenje [100].

Kako se vidi, vod se posle prvog isključenja O_1 ostavlja 0,3 s bez napona kako bi se omogućila dejonizacija vazduha na mestu kvara. U trenutku C_1 vod se ponovo stavlja pod napon i, ako kvar i dalje postoji, odmah još jednom isključuje

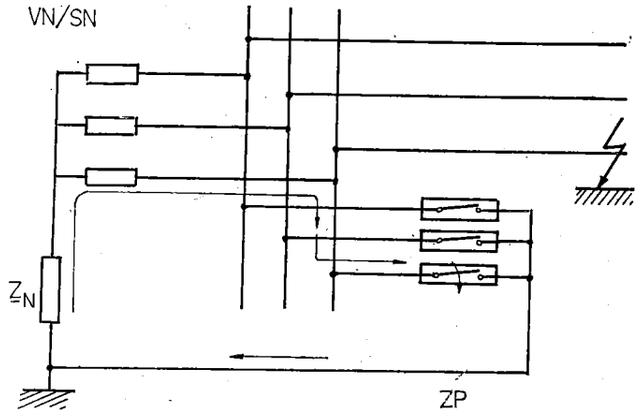
u O_2. Za razliku od prvog, brzog ponovnog uključenja, posle drugog isključenja vod se ostavlja bez napona 15 s. Ako je i drugo, sporo ponovno uključenje u C_2 takođe neuspešno, u O_3 dolazi do definitivnog isključenja voda. Sve navdene



Sl. 7.30

operacije su trofazne. Dužina beznaponskih pauzi se bira iskustveno, tako da zadovolji dva oprečna zahteva: da ne bude preduga kako bi pravila manje smetnje potrošačima i da ne bude prekratka za dejonizaciju i samogašenje zemljospojeva. Kako se vidi iz podataka navedenih u 8. Poglavlju, brzim ponovnim uključenjem eliminiše se oko 70% kvarova na vodovima, a sporim ponovnim uključenjem još oko 20%.

Osnovni nedostatak tehnike automatskog ponovnog uključenja sastoji se u tome što se njenom primenom i kod uspešnog delovanja, potrošači ostavljaju izvesno vreme bez napona. Kod osetljivih potrošača, kakvi su računski centri i različiti elektronski sistemi za upravljanje i automati, čak i kratka beznaponska pauza predstavlja ozbiljne smetnje [103].



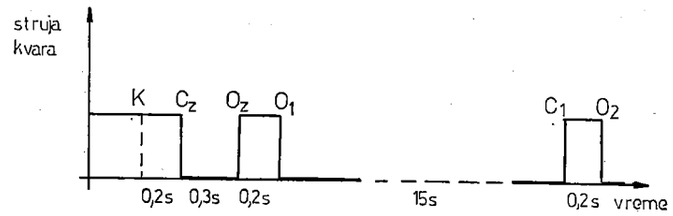
Sl. 7.31

Navedene teškoće mogu se delimično izbeći primenom zemljospojnog prekidača, koji se dosta široko koristi u vazdušnim mrežama Francuske [100, 103].

Zemljospojni prekidač postavlja se u napojnoj transformatorskoj stanici tako da može da spoji sa zemljom svaku od faza sabirnica (sl. 7.31). Zemljospojni prekidač sastoji se od tri monofazne konstrukcije koje se nezavisno upravljaju odgovarajućom zaštitom i automatikom.

U slučaju nastanka zemljospoja na jednoj od faza mreže odgovarajući pol zemljospojnog prekidača uzemljuje kratkovremeno pogođenu fazu. Pomenuta manipulacija ima na pogođenu fazu isti efekat kao i kratka beznaponska pauza kod brzog APU. Prespajanjem faze u zemljospoju, međutim, ne remete se bitno međufazni naponi mreže ni na ispravnim vodovima, ni na vodu u kvaru. Potrošači na niskom naponu ne izlažu se stoga velikim promenama napona i ne registruju uopšte delovanje zemljospojnog prekidača. U ovom pogledu razmatrana tehnika ima jasnu prednost u poređenju sa APU. Njom se u pogledu eliminacije uticaja prolaznih kvarova na potrošače postiže približno isti efekat kao u slučaju primene kompenzacionih prigušnica.

Zemljospojnim prekidačem mogu se otkloniti samo prolazni zemljospojevi za čije je odstranjivanje dovoljna kratkotrajna beznaponska pauza, tako da se pomenuta tehnika može koristiti u kombinaciji sa brzim i sporim APU ili samo sporim APU koje se ostvaruje prekidačem u neispravnom vodu. Mogući ciklusi elminacije prolaznih zemljospojeva sa kombinacijom zemljospojni prekidač — sporo APU prikazan je na sl. 7.32.



Sl. 7.32

Primena zemljospojnih prekidača, pored uočene prednosti u odnosu na brzo APU, ima i izvesnih mana.

Sa zemljospojnim prekidačima jednofazni zemljospojevi se ne isključuju odmah i mreža radi duže sa zemljospojem nego inače. Ovo može da prouzrokuje drugi zemljospoj na jednoj od ispravnih faza, što dovodi do dvostrukog zemljospoja. Pošto se struja dvostrukog zemljospoja zatvara preko zemljospojnog prekidača, ovaj mora da bude dimenzionisan tako da je u stanju da podnese pomenutu struju.

Zemljospojni prekidač ne sme da reaguje kod kvarova kod kojih je obuhvaćeno više faza, pošto bi prouzrokovao kratke spojeve na napojnim sabirnicama. Pomenuta tehnika se stoga ne može primeniti za otklanjanje prolaznih višefaznih kvarova.

Pravilno delovanje zemljospojnih prekidača u odnosu na vrstu i mesto kvara i druge vidove zaštite mreže, zahteva uvođenje dopunskih zaštitnih organa i automatike u postrojenja što ova čini skupljim i složenijim.

Da bi se izbegli prenaponi pri komutacijama u mreži kod primene zemljospojnih prekidača, preporučuje se uzemljenje neutralne tačke preko otpornika. Ovo može da dovede do teškoća u mrežama kod kojih treba izvoditi veštačku neutralnu tačku, gde bi se za uzemljenje morala koristiti kombinacija otpornika i transformatora za uzemljenje.

7.6.3. ZEMLJOSPOJNA ZAŠTITA U IZVORNOJ TS

Zaštita sabirnica

Za zaštitu od zemljospojeva na napojnim sabirnicama može se koristiti prekostrujni rele koji se priključuje na strujne transformatore na vezi transformator — sabirnice tako da registruje nulte komponente struje (sl. 7.33, rele S). Pomenuta zaštita mora da bude vremenski stepenovana u odnosu na zemljospojnu zaštitu vodova kako ne bi reagovala kod kvarova na vodovima. Zaštita aktivira prekidače na obe strane transformatora.

Budući da je pobuđuju svi kvarovi na vodovima, zaštita sabirnica predstavlja i rezervnu zemljospojnu zaštitu vodova. Inače, pored sabirnica, ona štiti postrojenje i od zemljospojeva na vezi transformator — sabirnice, na delu između strujnih transformatora i sabirnica.

Struja reagovanja zemljospojne zaštite sabirnica treba da bude izabrana tako da obezbedi sigurno aktiviranje prekidača, ne samo kod zemljospojeva na sabirnicama, nego i kod zemljospojeva na kraju najdužeg voda napajane mreže, kako bi se postiglo rezerviranje zaštite vodova. Saglasno (7.82), trebalo bi, prema tome, da bude

$$I_R < \mu_{\max} \frac{U_{nf}}{Z_N}, \tag{7.88}$$

gde se $\mu_{\max}$ odnosi na vod sa najvećim impedansama.

Struje I_R, izabrane prema uslovu (7.88), mogu da kod transformatora velikih snaga, kakvi su na primer transformatori 110/10 kV, budu vrlo male u odnosu na normalne radne struje pa, prema tome, i u odnosu na primarne nazivne struje strujnih transformatora. Ovo, kako su pokazala orijentaciona razmatranja u 7.3.2, može da onemogući korišćenje Holmgrin-šeme strujnih transformatora, što dovodi u pitanje primenu opisane zaštite, uopšte, budući da ugradnja obuhvatnih transformatora na razmatranoj vezi često neće moći da dođe u obzir iz konstruktivnih razloga.

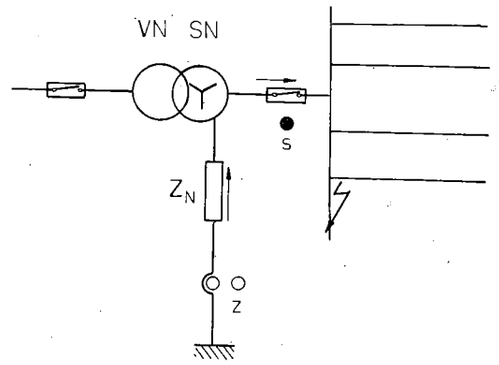
Zaštita impedanse za uzemljenje

Impedansu za uzemljenje treba zaštititi od pregrevanja koje može da prouzrokuje struja jednofaznog zemljospoja, ako se zemljospoj iz bilo kojih razloga nije otklonio delovanjem postojeće zemljospojne zaštite u mreži i postrojenju.

Zaštita impedanse izvodi se sa uspehom kao prekostrujna, sa prikladnim strujnim i vremenskim podešenjima koja mogu da oblast zaštite znatno prošire u

odnosu na osnovnu namenu. Zaštita se vezuje na strujni transformator ugrađen u strujno kolo impedanse za uzemljenje (sl. 7.33, zaštita Z).

Pošto struja zemljospoja kod kvarova, bilo u mreži, bilo u postrojenju, protiče kroz kolo za uzemljenje, zaštita impedanse može da dobije i ulogu rezervne zemljospojne zaštite vodova i sabirnica i osnovne zaštite za deo veza između transformatora



Sl. 7.33

i sabirnica koji zaštita sabirnica ne obuhvata. Zaštita impedanse za uzemljenje može se podesiti tako da u potpunosti zameni zaštitu sabirnica i veze transformator — sabirnica i pomenute zaštite mogu, kao posebne, izostati. Ovim se pojednostavljuje šema postrojenja.

Zaštita impedanse, najzad, može da se iskoristi i kao osnovna zaštita za eliminaciju zemljospojeva sa velikim prelaznim otpornostima, koje nije u stanju da registruje zaštita vodova.

Da bi imala funkciju rezervne zemljospojne zaštite vodova i sabirnica, zaštita u kolu za uzemljenje trebalo bi da bude podešena prema kriterijumima

$$I_{RZ} < \min(I_{RV}, I_{RS}) \tag{7.89}$$

i

$$t_{RZ} > t' = \begin{cases} t_{RS} & \text{postoji } S\text{-zaštita} \\ t_{RV\max} & \text{ne postoji } S\text{-zaštita} \end{cases} \tag{7.90}$$

U (7.89) i (7.90) su sa I_{RV} i I_{RS} označene struje reagovanja zemljospojne zaštite vodova i sabirnica, a sa t_{RV} i t_{RS} vremenska podešenja ovih zaštita. Simboli I_{RZ} i t_{RZ} predstavljaju struju i vreme reagovanja zaštite impedanse, respektivno.

Da bi se obezbedila zaštita impedanse za uzemljenje od pregrevanja pri zemljospoju treba da jednovremeno budu zadovoljeni uslovi

$$I_{RZ} < I_{nz}, \tag{7.91}$$

$$t_{RZ} \leqslant t_d. \tag{7.92}$$

Simbol I_{nz} označava »nazivnu struju« impedanse koja praktično predstavlja struju jednofaznog zemljospoja u mreži kod kvarova na napojnim sabirnicama (Tačke 5.4.2 i 5.5.4).

Sa t_d je označeno dozvoljeno vreme rada impedanse sa nazivnom strujom.

Impedansu za uzemljenje treba štititi i od manjih trajnih struja koje se mogu imati kod zemljospoja sa velikom prelaznom otpornošću, kada je pomenuta struja nedovoljno velika za aktiviranje zaštite vodova i eventualne zaštite sabiranica. Ovakvi se slučajevi moraju očekivati u vazdušnim mrežama. Dobra zaštita od pomenute vrste opterećenja postiže se ako se struja reagovanja I_{RZ} izabere tako da bude manja od trajno dozvoljene struje impedanse za uzemljenje

$$I_{RZ} < I_{td}. \tag{7.93}$$

Poređenjem kriterijuma (7.89) do (7.93) zaključuje se da će sve funkcije zaštite biti zadovoljene ako se vreme reagovanja izabere u opsegu

$$t' + \Delta t \leqslant t_{RZ} \leqslant t_d, \tag{7.94}$$

a struja reagovanja podesi prema uslovu

$$I_{RZ} < \min(I_{RV},\ I_{RS},\ I_{td}). \tag{7.95}$$

U (7.94) je sa Δt označeno vremensko stepenovanje zaštite radi selektivnosti. Najmanja od struja na desnoj strani (7.95) je obično I_{td}.

Donju granicu za struju I_{RZ} treba izabrati tako da ne dođe do reagovanja relea u normalnom pogonu usled proticanja struja viših harmonika, posebno trećeg, a i da se obezbedi sigurno delovanje zaštite s obzirom na karakteristike strujnog transformatora i prekostrujnog relea.

Struja trećeg harmonika posledica je nelinearnosti karakteristike magnećenja samog napojnog transformatora, pošto zbog sprega prijemnih transformatora treći harmonici struja usled uticaja ovih transformatora i potrošača ne prodiru u znatnijoj meri u mrežu (Tačka 4.1.3).

Pomenuta struja može se izračunati prema relaciji

$$I^{(3)} = \alpha_\mu^{(3)}\, \beta^{(3)}\, I_\mu = \alpha_\mu^{(3)}\, \beta^{(3)}\, i_\mu \frac{S_n}{\sqrt{3}\, U_n}, \tag{7.96}$$

koja se može izvesti iz šema mreže za treći harmonik.

U (7.96) je sa I_μ označena struja magnećenja transformatora, sa i_μ relativna vrednost ove struje, a S_n i U_n su nazivna snaga napojnog transformatora i njegov nazivni napon na strani na kojoj je priključena impedansa za uzemljenje. Sačinilac $\alpha_\mu^{(3)}$ predstavlja odnos efektivnih vrednosti trećeg harmonika u struji magnećenja i ukupne struje magnećenja. On zavisi od vrste upotrebljenog transformatorskog lima, radne indukcije u magnetnom kolu i sprega namotaja transformatora.

Koeficijentom $\beta^{(3)}$ obuhvata se uticaj odnosa impedansi transformatora i mreže na putevima proticanja trećeg harmonika. Kada transformator ima namotaj na strani višeg napona spregnut u trougao, što je čest slučaj, sačinilac $\beta^{(3)}$ može se odrediti prema izrazu

$$\beta^{(3)} \approx \left| 1 + \frac{Z_M^{(3)}}{jX_T^{(3)}} \right|^{-1}.$$

Ovde je $X_T^{(3)}$ ukupna reaktansa rasipanja transformatora a $Z_M^{(3)}$ impedansa mreže na strani uzemljenja, pri čemu se oba parametra određuju za trostruku učestanost. Kako se može videti, u razmatranom slučaju je $\beta^{(3)} \ll 1$.

Prekostrujni relei mogu se podešavati da se aktiviraju pri strujama

$$I_{RZ}'' = k I_n''. \tag{7.97}$$

Ovde je sa I_n'' označena nazivna struja relea koja se po pravilu poklapa sa nazivnom sekundarnom strujom strujnog transformatora. Sačinilac k kreće se obično u skokovima u opsegu od nekoliko desetina do nekoliko jedinica.

Minimalna struja reagovanja koja se može podesiti na releu biće, svedeno na primarnu stranu,

$$I_{RZ\,\min} = k_{\min}\, m, \tag{7.98}$$

gde je sa m označen odnos preobražaja strujnog transformatora. Izraz (7.98) pokazuje da se struja $I_{RZ\,\min}$ može smanjiti usvajanjem manjeg m odnosno manje primarne nazivne struje strujnog transformatora, I_n'.

Pomenuta struja može da bude dosta niža od nazivne struje impedanse I_{nz}, pošto je ova kratkotrajna. Pri tom, strujni transformator treba da bude izabran tako da bude zadovoljen uslov

$$I_t^2\, t_t \geqslant I_{nz}^2\, t_d, \tag{7.99}$$

gde je I_t dozvoljena prekomerna struja transformatora u vremenu t_t, sa stanovišta zagrevanja.

Iz (7.99) se dobija

$$I_t \geqslant I_{nz} \sqrt{\frac{t_d}{t_t}}. \tag{7.100}$$

Pored opisane zaštite, usklađene sa parametrima mreže i postrojenja, impedanse za uzemljenje mogu da imaju i svoju dodatnu zaštitu predviđenu od strane proizvođača. Tako se kod prigušnica u ulju može predvideti gasna zaštita, a kod metalnih otpornika posebna termička zaštita, na primer preko bimetalnih kontakata.

Posebna zaštita od jednofaznih zemljospojeva sa velikom prelaznom otpornošću

Prethodno opisana zaštita impedanse za uzemljenje kod svakog jednofaznog zemljospoja sa velikom prelaznom otpornošću isključuje transformator i tako ostavlja celu mrežu bez napona. Drugi nedostatak opisane prekostrujne zaštite sastoji se u tome što pomenuta zaštita, zbog postojećih ograničenja u pogledu minimalnih struja reagovanja, ne može pouzdano da registruje kvarove sa vrlo velikom prelaznom otpornošću, na primer većom od reda 1000 Ω. Navedeni nedostatak je, međutim, pošto se pomenute prelazne otpornosti vrlo retko imaju, od manjeg praktičnog značaja.

Prvi od navedenih nedostataka može se izbeći primenom dvostepene prekostrujne zaštite, sa različitim strujnim i vremenskim podešenjima. Prvi stepen pomenute zaštite bio bi predviđen za rezervnu zaštitu vodova i sabirnica i davao bi signal za

isključenje transformatora. Ovaj bi stepen trebalo, s obzirom na namenu, podesiti da ima struju reagovanja

$$I_{RZ1} = \min (I_{RV}, I_{RS}). \tag{7.101}$$

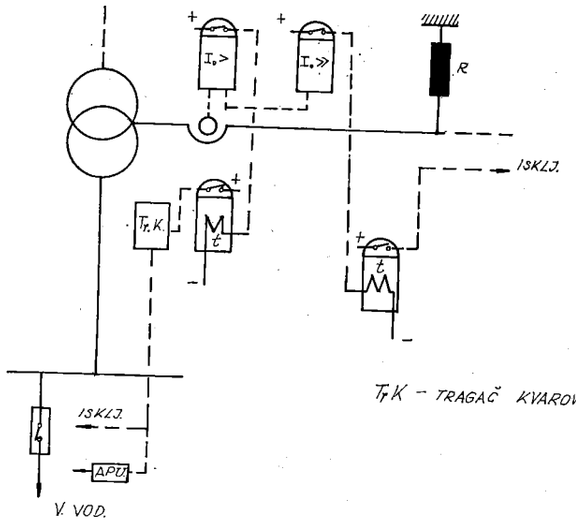
Vreme reagovanja bi se moglo usvojiti saglasno (7.94).

Struja reagovanja drugog stepena, I_{RZ2}, birala bi se tako da se zaštita aktivira pri malim strujama koje se mogu imati kod zemljospojeva sa velikom prelaznom otpornošću.

Kriterijum za izbor struje I_{RZ2} moglo bi biti, s obzirom na (7.96) i (7.98),

$$\max (I_{RZ2\,\min}, I^{(3)}) < I_{RZ2} < I_{td}. \tag{7.102}$$

Drugi stepen bi aktivirao tragač kvarova koji bi redom isključivao vodove mreže uz APU sve dok postoji signal zemljospoja. Transformator bi se isključio tek ako bi rele ostao aktiviran i pošto je poslednji vod isključen. Principijelna šema vezivanja opisane zaštite prikazana je na sl. 7.34.



Sl. 7.34

Za otkrivanje jednofaznih zemljospojeva sa velikom prelaznom otpornošću u Francuskoj se koristi specijalni indikator koji se sastoji od vrlo osetljivog relea i strujnog transformatora, prilagođenih karakteristika, koji se takođe uključuje u kolo impedanse za uzemljenje [100]. Relejni uređaj je izveden tako da je neosetljiv na treći harmonik struje a može se podesiti da reaguje pri strujama zemljospoja 0,5 do 1,5 A, računato na strani primarnog kola. Strujni transformator se jako zasićuje kod većih primarnih struja, tako da normalne struje zemljospoja ne mogu da oštete indikator.

8. STATISTIČKI PODACI O KVAROVIMA U RAZLIČITO UZEMLJENIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Jednim od osnovnih merila kvaliteta određene mreže može se smatrati broj i vrsta kvarova u toku karakterističnog vremenskog perioda po jedinici dužine vodova, ako se ova usvoji kao opšta mera njene prostranosti. Poređenje ovakvih podataka sa odgovarajućim pokazateljima za druge mreže u kojima su primenjeni isti način uzemljenja neutralne tačke i tehnika zaštite ili signalizacije, može da ukaže na nedostatke u izboru opreme, projektovanju, održavanju, remontu i organizaciji eksploatacije. Povećani broj trajnih jednofaznih zemljospojeva i naročito jednofaznih zemljospojeva koji prelaze u višefazne kvarove na istom mestu ili u dvostruke i višestruke zemljospojeve, kod izolovanih ili kompenzovanih mreža, ukazuju na potrebu izmene načina uzemljenja neutralne tačke ili izmene vrste i podešenja zaštite, signalizacije i automatike, razdvajanja mreža u manje delove, kao i preduzimanja drugih mera.

Podaci o radu različito uzemljenih mreža mogu korisno poslužiti i pri opredeljivanju za nove tehnike uzemljenja i zaštite. Na osnovu njih se mogu orijentaciono proceniti kakvi će biti uslovi rada mreže posle unesenih izmena i tako učiniti povoljan tehničko-ekonomski izbor.

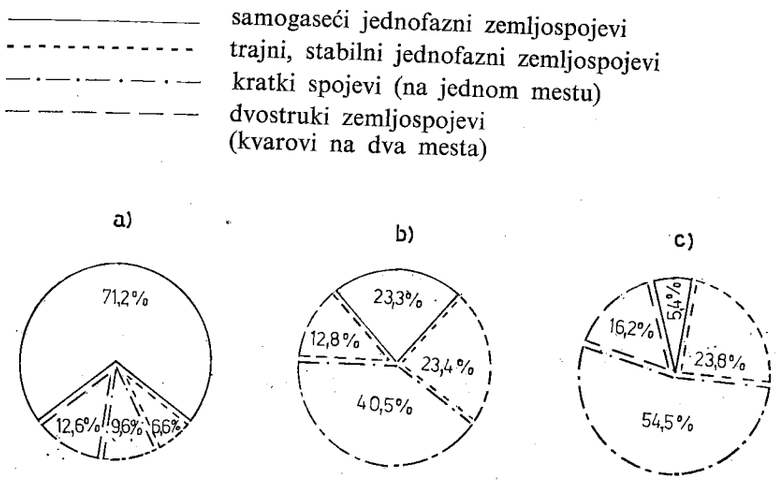
Podaci o vrstama i trajanju kvarova mogu poslužiti kod izbora tipa i načina podešenja zaštite. Isti podaci omogućavaju i procene verovatnoće i trajanja opasnih napona kod objekata mreže pri kvarovima, koje predstavljaju podlogu za preduzimanje odgovarajućih zaštitnih mera.

Navedeni razlozi pokazuju koliko je važno pratiti rad mreže i beležiti, analizirati i statistički obrađivati kvarove i druge poremećaje.

Pri korišćenju podataka o kvarovima u različitim mrežama, treba voditi računa o svim specifičnostima ovih mreža kako u pogledu tehničkih karakteristika, tako i s obzirom na uslove ambijenta, prvenstveno sa gledišta atmosferskih pražnjenja i aerozagađenja. Takođe treba voditi računa o načinu na koji su navedeni podaci ustanovljeni, da bi se procenila njihova potpunost, naročito u pogledu prolaznih kvarova.

Podaci koji će biti dati u ovom poglavlju potiču iz više izvora i različitih zemalja. Pojedini su uzeti iz časopisa i knjiga, drugi iz internih publikacija pojedinih distributivnih preduzeća, a izvestan broj podataka dobijen je i u ličnim kontaktima.

Na slici 8.1 prikazana je procentualna struktura kvarova za najveći deo mreža 5 do 110 kV SR Nemačke prema podacima u [9], dobijenim 1961. godine anketom.



Sl. 8.1

Sektorski dijagrami ukazuju na procentualnu zastupljenost pojedinih vrsta kvarova u ukupnom specifičnom broju kvarova. Termin »specifični broj kvarova«, uveden jednostavnosti radi, označava broj kvarova u toku godine na 100 km dužine mreže.

Dijagram »a« odnosi se na kompenzovanu vazdušnu mrežu 110 kV sa specifičnim brojem kvarova $\lambda_k = 1{,}9$.

Dijagram »b« sastavljen je na osnovu podataka o 13 kompenzovanih, pretežno kablovskih mreža $5 \div 30$ kV sa ukupnom dužinom vodova 5.038 km, od čega je udeo vazdušnih vodova reda 4%. Specifični broj kvarova za razmatrane mreže iznosio je $\lambda_k = 7{,}3$.

Dijagram »c« dobijen je prema podacima za 10 pretežno kablovskih izolovanih mreža $5 \div 30$ kV sa ukupnom dužinom vodova 10.700 km od čega na vazdušne vodove otpada 0,4%. Specifičan broj kvarova za analiziranu grupu mreža iznosio je $\lambda_k = 1{,}8$.

Podaci o broju samogasećih zemljospojeva nisu potpuni pošto u pojedinim mrežama nisu sistematski beleženi.

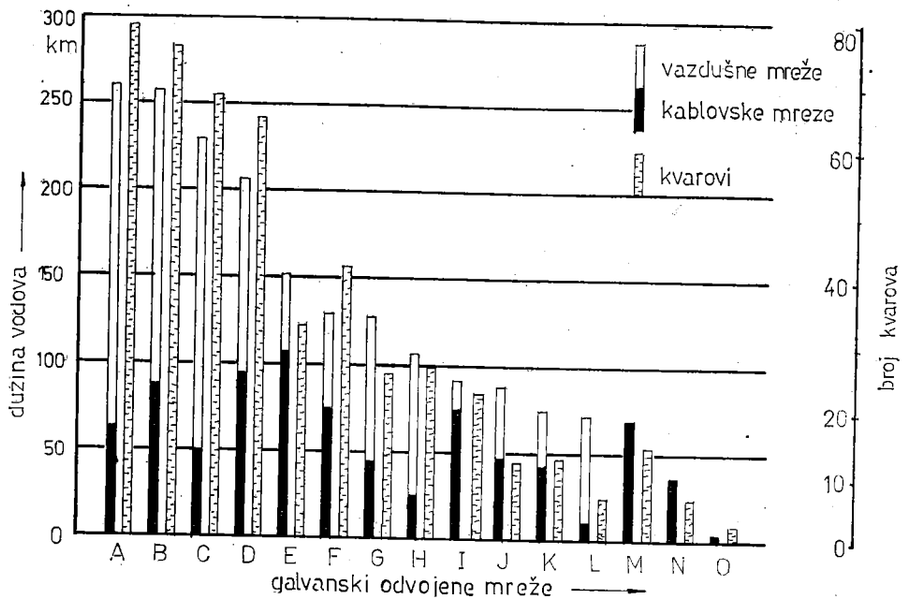
Velika razlika u λ_k kod mreža »b« i »c« posledica je znatnijeg udela vazdušnih vodova u mrežama »b«. Kod ovih je mreža iz istih razloga povećan procentualni udeo samogasećih zemljospojeva.

U mrežama 10 kV se, prema podacima u anketi, u pojedinim slučajevima radilo i duže od 4 h pod zemljospojem.

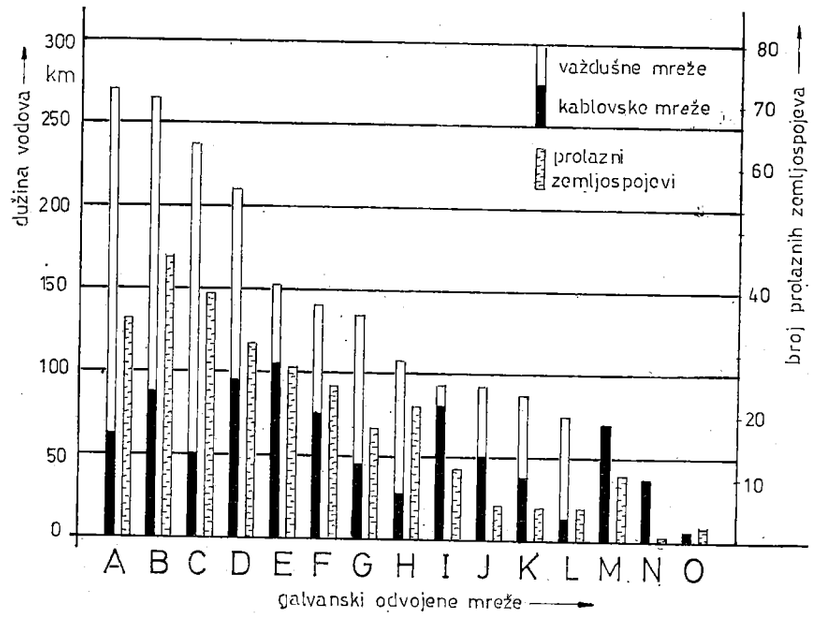
U [27] daje se pregled kvarova u 15 mreža 20 kV područja Darmštata, mešovitog sastava, sa ukupnom dužinom od oko 2.000 km. Na sl. 8.2 grafički je prikazan ukupni broj kvarova u razmatranim mrežama (mreže *A* do *O*) kao i njihova struktura.

U Tabeli 8.1 navedeni su podaci o lokaciji kvarova koji su mogli da budu pouzdano identifikovani.

Dijagram na sl. 8.2 pokazuje, što je bilo logično očekivati, da ukupan broj kvarova u mreži raste praktično linearno sa dužinom postojećih vodova.



Sl. 8.2



Sl 8.3

Na sl. 8.3 pokazan je broj prolaznih jednofaznih zemljospojeva u analiziranim mrežama. Iz navedenih podataka se vidi da je broj prolaznih zemljospojeva takođe direktno srazmeran ukupnoj dužini vodova. Pokazuje se, pored toga, da je i kod pretežno kablovskih mreža zabeleženo dosta prolaznih kvarova. Ovo se može protumačiti time što su u dijagrame uključeni i kvarovi u pripadajućim TS srednji/niski napon koji se obrazuju u vazduhu na različitoj opremi.

TABELA 8.1

Vrsta kvara	U transformatorskoj stanici	Na kablovima (uključujući kablovske završnice)	Na vazdušnim vodovima
Trajni jednofazni zemljospoj bez naknadnih kratkih spojeva	1	12	6
Intermitentni jednofazni zemljospoj	—	1	—
Jednofazni zemljospoj koji je prešao u kratak spoj na mestu kvara	1	5	1
Jednofazni zemljospoj koji je prouzrokovao dvostruki zemljospoj	—	4	—
Kratak spoj bez prethodnog zemljospoja	13	5	21
Dvostruki zemljospoj bez prethodnog zemljospoja	4	1	2
Ukupno:	19	28	30

Iz navedenog dijagrama moglo bi se zaključiti da vazdušne mreže nemaju izrazito veći specifični broj prolaznih jednofaznih zemljospojeva od kablovskih mreža (uporediti, na primer, mreže *E*, *I* i *M* sa mrežama *D*, *J* i *L*, respektivno). Takođe je interesantno uočiti da je i specifični broj prolaznih zemljospojeva, koji iznosi 20÷30 (1/100 km, god.), vrlo mali za vazdušne vodove. Oba pomenuta podatka su, ili vrlo specifična za proučavanje mreže ili, što je verovatnije, posledica toga što znatni broj prolaznih kvarova nije registrovan i obuhvaćen u dijagramima.

U diskusiji o pitanjima uzemljenja srednjenaponskih mreža, održanoj 1961. godine u Karlsrueu, SR Nemačka, izneseni su podaci o kvarovima u mrežama 25 kV u Hamburgu, registrovanim u četvorogodišnjem periodu. Ukupno je analizirano 12 mreža, izolovanih ili kompenzovanih sa različitim podešenjima.

Tri mreže sa potpunom kompenzacijom su mešovite, a ostale čisto kablovske.

Podaci o kvarovima dati su u Tabeli 8.2.

TABELA 8.2

Vrsta kvara	Broj kvarova	Od toga u mrežama sa kompenzacijom			
		100%	80%	5%	0%
Samogaseći jednofazni zemljospoj	23	5	8	4	6
Trajni jednofazni zemljospoj	28	14	7	2	5
Jednofazni zemljospoj sa prelazom u kratki spoj	35	15	8	0	12
Jednofazni zemljospoj sa prelazom u dvostruki zemljospoj	3	1	1	1	0
Ukupno:	89	35	24	7	23

Podela mreža prema načinu uzemljenja prikazana je u Tabeli 8.3.

TABELA 8.3

	Ukupno	Mreža kompenzovana do oko			
		100%	80%	50%	0%
Broj mreža	12	3	2	1	6
Preostala struja, odnosno struja zemljospoja, A	—	20÷50	25÷100	100÷150	25÷250

Tabela 8.2 pokazuje da nije konstatovana nikakva razlika između izolovanih i kompenzovanih mreža ni u pogledu broja samogasećih jednofaznih zemljospojeva ni u pogledu broja dvostrukih zemljospojeva. Ovo znači da izolacija mreža ima toliku rezervu da joj bitno ne smetaju prenaponi, tako da na kvalitet njenog rada ne utiče način uzemljenja neutralne tačke. Najveći broj prolaznih kvarova u kablovskim mrežama bio je na kablovskim završnicama, gde je pod uticajem zagrejane kablovske mase dolazilo do gašenja uspostavljenog električnog luka.

U [28] navode se podaci o broju i strukturi kvarova u tri mešovite mreže srednjeg napona, dve 20 kV i jedne 15 kV, izabrane kao tipske u pogledu načina uzemljenja neutralne tačke za praksu SR Nemačke, Francuske i Italije. Mreža 20 kV »Wiesloch« — SR Nemačka radi kao kompenzovana, mreža 20 kV »Schlettstadt« — Francuska uzemljena je preko niskoomskog otpornika, a mreža 15 kV »Corsico« — Italija radi izolovana.

U francuskoj i italijanskoj mreži primenjena je zaštita sa brzim i naknadnim sporim ponovnim uključenjem.

Pregled specifičnog broja trajnih kvarova, λ_{kt}, u pomenutim mrežama prikazan je u Tabeli 8.4.

TABELA 8.4

λ_{kt} (1/100 km, god.)	SR Nemačka	Francuska	Italija
	10	5	5,8

Specifični broj prolaznih kvarova dat je u Tabeli 8.5.

TABELA 8.5

Kvarovi		Francuska	Italija
Kvarovi otklonjeni u prvoj beznaponskoj pauzi	Jednofazni	70	14
	Višefazni	30	31
Kvarovi otklonjeni u drugoj beznaponskoj pauzi	Jednofazni	7	9
	Višefazni	3	19
Ukupno:		110	73

U mreži »Wiescloch« nije bilo prolaznih kvarova koji su dovodili do prekida pogona.

Objašnjenje za dosta visoke brojke navedene u Tabeli 8.5 treba tražiti u tome što je primenjenom tehnikom zaštite precizno registrovan svaki kvar pa i mnogi vrlo kratkotrajni zemljospojevi usled atmosferskih pražnjenja, kao i zbog verovatno znatnog udela vazdušnih vodova u ukupnoj dužini mreže. Kada ne bi bila primenjena tehnika ponovnog uključenja, svi nabrojani kvarovi doveli bi do trajnijeg prekida pogona.

Tabela 8.6 daje podatke o broju i strukturi kvarova u 13 mešovitih i 7 kablovskih mreža 10 kV područja Bohuma (Bochum) u 1967. godini [18].

Kako se vidi iz priložene tabele, analizirane mreže su, gledano celovito, pretežno kablovske. Time se mogu objasniti mali specifični brojevi kvarova.

U mešovitim mrežama primenjen je različit tretman neutralne tačke. Kablovske mreže su isključivo kompenzovane ili izolovane. Kablovi su pojasni sa papirnom izolacijom.

Tabela 8.6 ukazuje na relativno veliki procenat samogasećih zemljospojeva u kablovskim mrežama, što je u saglasnosti sa podacima prema dijagramima na sl. 8.2 i 8.3.

Kod mešovitih mreža, kako se vidi, prolazni zemljospojevi čine 73%, a kod pretežno kablovskih mreža, približno isto, oko 67% svih registrovanih jednofaznih zemljospojeva. Dvostruki i višestruki zemljospojevi kod razmatranih mreža konstatovani su u 13,7%, odnosno 7,8% slučajeva svih zemljospojeva, respektivno.

TABELA 8.6

Vrsta kvara	13 mešovitih mreža 244 km v. vod. 13% 1636 km k. vod. 87%		7 kablovskih mreža 16 km v. vod. 2% 909 km k. vod. 98%	
	1880 km ukupno = 100%		925 km ukupno = 100%	
	Broj kvarova	%	Broj kvarova	%
Samogaseći jednofazni zemljospojevi	122	35	60	44
Trajni jednofazni zemljospojevi	22	6	12	8,5
Dvo i višestruki zemljospojevi	23	6,5	7	5
Kratki spojevi	12	3,5	—	—
Ostali kvarovi	171	49	58	42,5
Ukupno kvarova	350	100	137	100
Specifičan broj kvarova λ_k (1/100 km, god.)	18,6		14,8	

Na sl. 8.4 prikazani su dijagramima struktura i broj kvarova u 13 mreža 10 kV Bohuma u 1967. godini. Ukupna dužina vodova posmatranih mreža iznosi 1880 km, od čega je 244 km vazdušnih vodova. Mreža 6 je bila uzemljena preko reaktanse od 4 Ω.

Na sl. 8.5 je na isti način dat pregled kvarova u mreži 6 za pogon sa izolovanom neutralnom tačkom, uzemljenjem preko male reaktanse, i najzad, sa kombinovanim uzemljenjem: kompenzaciona prigušnica — mala reaktansa. Takođe se daju podaci i za mreže 2 i 3 posle prelaska na kombinovano uzemljenje.

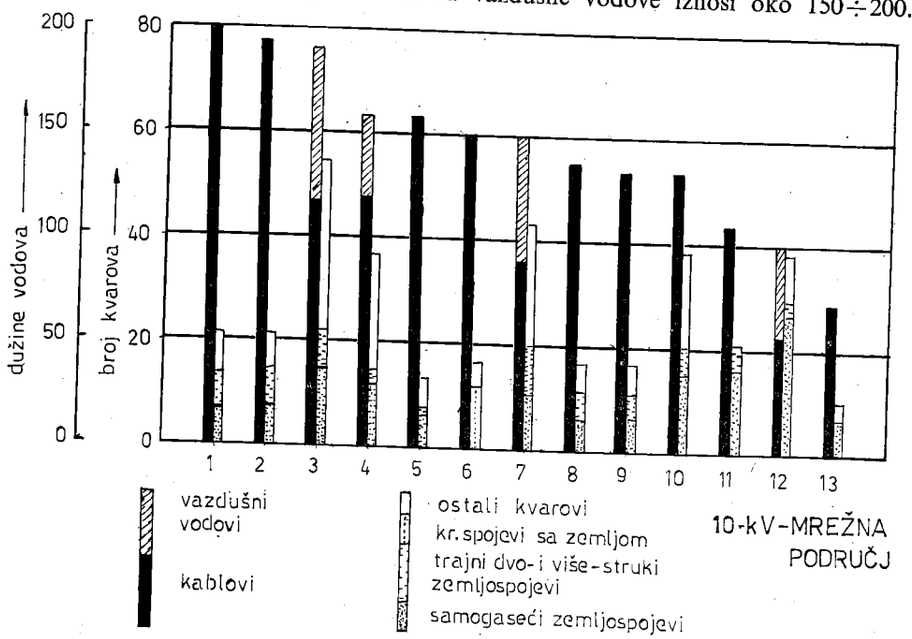
U Tabeli 8.7 dat je pregled broja kvarova i isključenja u mrežama na sl. 8.5.

Kako se iz Tabele 8.7 i sl. 8.5 vidi, uzemljenje neutralne tačke preko male reaktanse smanjilo je broj kvarova u mreži za oko 25% u odnosu na izolovani pogon, ali je zato povećalo za oko 40% broj isključenja.

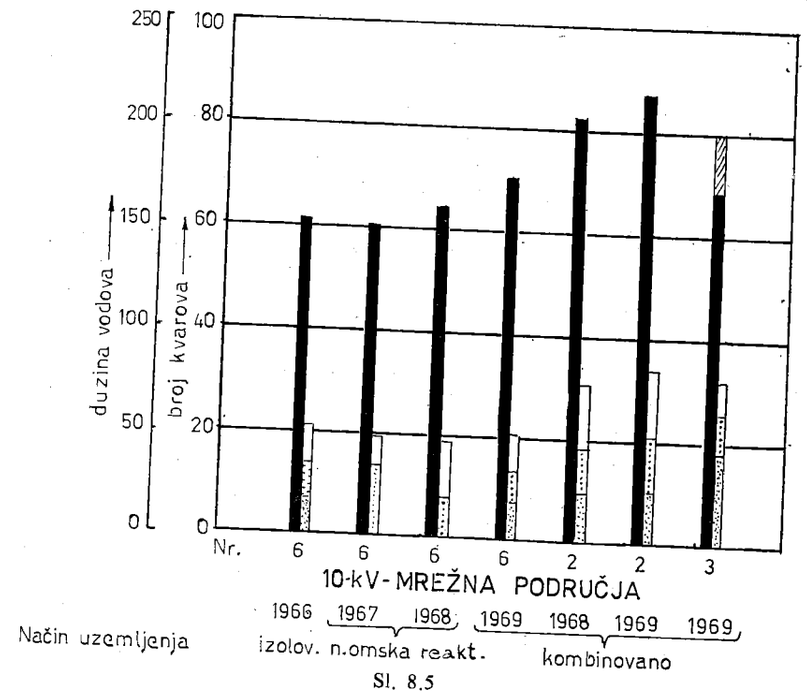
Analiza podataka na sl. 8.4 pokazuje da specifičan broj kvarova za kablovske mreže leži u opsegu 9 do 15, s izuzetkom mreže br. 10 kod koje je ovaj broj oko 30, zbog osetnog procenta »ostalih« kvarova.

Na osnovu podataka za mešovite mreže, koje se zbog udela vazdušnih vodova karakterišu velikim specifičnim brojevima kvarova (ovaj broj za razmatrane mreže

leži u opsegu 40÷100 i raste sa povećanim udelom vazdušnih vodova), može se proceniti da specifični broj kvarova za vazdušne vodove iznosi oko 150÷200.



Sl. 8.4



Sl. 8.5

Podaci o mrežama 10 kV na području Bohuma zabeleženi su preko registratora kratkih spojeva, naročito ugrađenih u ove svrhe. Navedeni podaci imaju zato posebnu vrednost i odražavaju stvarne prilike u mrežama.

TABELA 8.7

Oznaka mreže	Mreža 10 kV						
	6	6	6	6	2	2	3
Godina	1966	1967	1968	1969	1968	1969	1969
Vrsta uzemljenja	Izolovana	Uzemljenje preko reaktanse 4 Ω		Kombinovano uzemljenje			
Broj kvarova/100 km	13,7	11,9	10,6	11,4	13,9	14,7	15,0
Broj isključenja/100 km	7,8	11,3	10,6	8,4	10,2	11,1	6,0

Prema pogonskim iskustvima kablovskih mreža 10 kV Minhena, koje su najvećim delom kompenzovane, prolazni jednofazni zemljospojevi čine oko 45%, a dvostruki zemljospojevi oko 5% svih kvarova u mreži. Najveći broj kvarova, ne računajući one usled spoljnih mehaničkih oštećenja kablova, ustanovljen je na kablovskim završnicama.

U [104] navode se podaci o broju zabeleženih zemljospojeva u četiri vazdušne mreže 15 kV u DR Nemačkoj. Za registrovanje zemljospojeva ugrađeni su specijalni elektronski brojači. Statistička obrada dobijenih rezultata pokazala je da je u razmatranim periodima specifični broj zemljospojeva za pomenute mreže imao vrednost iz opsega 130—370 (1/100 km, god.), što je neuporedivo više od broja koje je registrovalo pogonsko osoblje na osnovu signalizacije zemljospojeva. Ekstremni primer u ovom pogledu bila je mreža Wernigerode u kojoj je brojačem zabeleženo 370 jednofaznih zemljospojeva na 100 km u toku godine dok je specifični broj ovih zemljospojeva registrovan ranije, praćenjem signalizacije, iznosio samo 15. Navedeni podaci pokazuju da se najveći broj kratkotrajnih zemljospojeva ne može uočiti bez posebnih registratora kvarova koji su neprekidno priključeni na mrežu.

Od zabeleženih zemljospojeva je u proseku više od 90% bilo prolaznih.

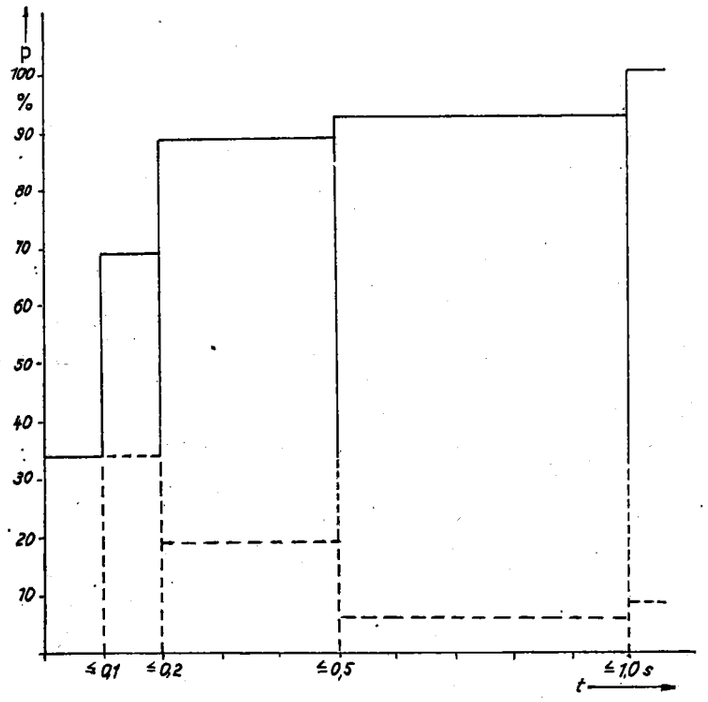
Elektronski brojači su pored broja kvarova beležili i njihovo trajanje, razvrstavajući ih u nekoliko vremenskih opsega. Na sl. 8.6 prikazani su rezultati ovakvih merenja za mrežu 15 kV Wernigerode, izvedenih u periodu od 16 meseci. Na ordinati dijagrama nanet je relativni broj jednofaznih zemljospojeva, računat u odnosu na ukupan broj zabeleženih jednofaznih zemljospojeva, a na apscisu vreme trajanja. Isprekidano izvučene linije pokazuju broj kvarova po vremenskim intervalima, a pune linije ukupan broj kvarova čije je vreme trajanja kraće od vrednosti na apscisi.

Kako se vidi, više od 30% jednofaznih zemljospojeva trajalo je kraće od 0,1 s, a isto je toliko trajalo od 0,1÷0,2 s.

Ukupan broj kvarova sa trajanjem manjim od 0,2 s iznosi, znači, oko 70% (puno izvučeni dijagram).

Udeo trajnih zemljospojeva iznosio je svega 2,8%.

Prema podacima dobijenim u distribuciji BEWAG, Berlin — Istok, specifični broj kvarova u kablovskim mrežama 6 kV vrlo je nizak i iznosi reda 2. Broj kvarova u mreži 10 kV, dobijenoj rekonstrukcijom mreže 6 kV, znatno je veći prema pogonskim iskustvima, iako posebna statistička obrada nije vršena.



Sl. 8.6

Struktura kvarova u kablovskim mrežama 6 kV, Berlin — Istok, procenjena analizom nakon poremećaja, data je u Tabeli 8.8.

TABELA 8.8

Vrsta kvara	Procenat (%)
Jednofazni zemljospojevi	15
Dvostruki zemljospojevi	5
Kratki spojevi	70
Ostali kvarovi	10

Podaci o kvarovima u kablovskim mrežama 6, 10 i 35 kV Moskve, dati su u Tabeli 8.9. Navedene mreže su najvećim delom kompenzovane, a ostali deo, koji čine mreže manje prostranosti, radi izolovano.

TABELA 8.9

Vrsta kvara	Specifični broj kvarova 1/(100 km, god.)
Trajni jednofazni zemljospojevi	7
Jednofazni zemljospojevi koji su prešli u kratke spojeve na mestu kvara	2
Dvostruki zemljospojevi	0,01

Prolazni zemljospojevi nisu beleženi.

U mrežama 6 i 10 kV Lenjigrada, koji rade kompenzovane (65%) ili sa izolovanim zvezdištem (35%), konstatovano je da oko 20% zemljospojeva prelazi u kratak spoj na mestu kvara.

U [17] navode se pozitivna iskustva sa primenom kompenzacionih prigušnica u različitim mrežama 6 do 150 kV. U Tabeli 8.10 dati su podaci o kvarovima u više mešovitih mreža 6, 15 i 60 kV. Sve mreže su radile sa dobrim, praktično tačnim podešenjem prigušnica.

TABELA 8.10

Nazivni napon (kV)	Broj mreža	Struje jednofaznog zemljospoja (A)	λ_{tz} (1/god)	λ_{zk} (1/god)	E_k
60	1	105	11	1	0,91
15	9	15,5—37	98	7	0,93
6	6	23—92	18	3	0,833

U tabeli je:

λ_{tz} — ukupan broj trajnih jednofaznih zemljospojeva u toku godine (za sve mreže istog naponskog nivoa),

λ_{zk} — broj jednofaznih zemljospojeva u toku godine koji su prešli u kratke spojeve,

$$E_k = \frac{\lambda_{tz} - \lambda_{zk}}{\lambda_{tz}} = 1 - \frac{\lambda_{zk}}{\lambda_{tz}}.$$

Parametar E_k označava tzv. »efektivnost kompenzacije«. Navedenom formulom nisu obuhvaćeni prolazni jednofazni zemljospojevi čije samogašenje obezbeđuje kompenzacija, tako da je njena realna efektivnost znatno veća.

U Tabeli 8.11 [17] navode se podaci o broju i strukturi kvarova kompenzovane mreže 35 kV u periodu kada je radila kao mešovita (1959÷1964) i posle odvajanja od vazdušnog dela (1965÷1968).

TABELA 8.11

Period eksploatacije	Broj jednofaznih zemljospojeva				Broj kvarova na na kablovima 35 kV
	Ukupno	Prolazni	Trajni (duži od 3′)	Prešli u kratak spoj	
1959÷1964	226	171	43	12	26
1965÷1968	13	8	5	—	3
UKUPNO:	239	179	48	12	29
%	100	75	20	5	—

Iz Tabele 8.11 se vidi da je efektivnost kompenzacije mešovite mreže, računata u odnosu na ukupan broj zemljospojeva (prolaznih i trajnih)

$$E_k = 1 - \frac{12}{226} = 0{,}947.$$

Efektivnost kablovske mreže u posmatranom periodu je potpuna, pošto nije registrovan nijedan kratak spoj proizašao iz jednofaznog zemljospoja.

U Francuskoj je u višegodišnjem periodu praćen rad niza vazdušnih mreža 15 kV i 20 kV posle uzemljenja neutralne tačke preko male impedanse [51]. Ukupna dužina vodova ovih mreža iznosila je oko 3000 km, a sve su bile opremljene zaštitom sa automatskim brzim i sporim ponovnim uključenjem ili zemljospojnim prekidačima. Struja jednofaznog zemljospoja bila je u svim mrežama podešena na 300 A.

Statistička obrada registrovanih havarija pokazala je da se ukupni specifični broj kvarova za razmatrane mreže kretao od 100 do 200, tako da je u proseku iznosio oko 150.

Po svojoj prirodi, kvarovi se mogu podeliti na:
— samogaseće 10%,
— prolazne 75% (od ovih je 65% do 75% bilo jednofaznih),
— lažno-trajne 10%,
— trajne 5%.

Kao samogaseći se smatraju oni kvarovi koji sami od sebe vrlo brzo iščezavaju, tako da ne dovode do delovanja prekidača. Prolaznim se smatraju kvarovi koji se mogu eliminisati kratkim prekidom napajanja u trajanju od reda nekoliko desetina

sekunde, znači brzim APU. Lažno-trajni su oni kvarovi koji se mogu otkloniti tek posle jedne ili više dužih naponskih pauza sa trajanjem od desetak i više sekundi, tako da se, bez trajnog prekida pogona, mogu eliminisati sa sporim APU. Trajnim se smatraju kvarovi koji se ne mogu otkloniti na drugi način nego trajnijim prekidom pogona i opravkom.

U ukupnom broju lažno-trajnih kvarova 8,5% je eliminisano u prvom ciklusu sporog APU, 1% u drugom, a 0,5% u trećem.

Od ukupno 6000 zemljospojeva, registrovanih u razmatranom periodu, sa otpornošću kvara manjom od 100 Ω bilo ih je 82%, sa otpornošću od 100 do 200 Ω 15%, od 200 do 300 Ω 2% i 1% sa otpornošću većom od 300 Ω. Ni u jednom slučaju nije konstatovana otpornost iznad 600 Ω.

Navedeni podaci o broju kvarova u dobrom su skladu sa ranije prikazanim podacima za mreže kod kojih je bilo osigurano potpuno beleženje kvarova, bilo zbog primene posebnih registratora kvarova ili zemljospojne zaštite. S obzirom da predstavljaju rezultate dugotrajne pogonske analize, pomenuti podaci daju dobru orijentaciju za procene uslova rada vazdušnih mreža u slučaju prelaska na uzemljenje preko male impedanse. Zabeležene vrednosti otpornosti na mestu kvara mogu takođe da posluže kao dobra osnova kod izbora vrste i podešenja zemljospojne zaštite.

U Tabelama 8.12 i 8.13 su dati sumarni podaci o kvarovima za celu kablovsku mrežu 10 kV grada Beograda u 1973. godini, dobijeni analizom dnevnih pogonskih izveštaja.

TABELA 8.12

Vrsta kvara	Broj kvarova	%	Specifičan broj kvarova
Trajni jednofazni zemljospojevi	48	65	6,22
Jednofazni zemljospojevi prešli u kratak spoj na jednom mestu			
Kratki spojevi na jednom mestu			
Dvostruki zemljospojevi i drugi višestruki kvarovi	<4	<5,5	<0,52
Mehaničko oštećenje kabla	24	32,4	3,11
Ostalo	2	2,6	0,26
UKUPAN BROJ KVAROVA	74	100	9,58

Tabela 8.12 daje pregled vrste kvarova. Pregledom nisu obuhvaćeni prolazni zemljospojevi, pošto se ovi ne registruju. Takođe ne postoje ni izdiferencirani podaci o jednostrukim kvarovima koji dovode do isključenja vodova, tako da su ovi dati

skupno za sve ovakve kvarove. Broj dvostrukih i višestrukih kvarova naveden u tabeli, ustanovljen je rekonstrukcijom događaja. U pomenutu vrstu kvarova ubrojani su svi grubo koincidentni događaji (u toku istog dana u istom mrežnom području), tako da je stvarni broj ovakvih kvarova verovatno manji od navedene brojke. Specifičan broj kvarova računat je za ukupnu dužinu kablovskih vodova $\Sigma l_{10\,kV}=772$ km.

TABELA 8.13

Mesto kvara	Broj	%
Kablovska završnica	10	14
Spojnica	26	35
Na kablu	12	16
Mehaničko oštećenje	24	32
Kvarovi u TS	2	3
UKUPNO	74	100

Tabela 8.13 daje pregled mesta kvarova.

Specifičan broj svih kvarova u mreži, uključujući i prolazne zemljospojeve, za beogradsku kablovsku mrežu iznosi, ako se pretpostavi da prolazni zemljospojevi čine 30% svih kvarova,

$$\lambda_k=9{,}58\cdot 1{,}3=12{,}35.$$

Kako se vidi, ustanovljeni broj kvarova istog je reda vrednosti kao i kod drugih mreža 10 kV sa različito uzemljenom neutralnom tačkom. Izračunato λ_k verovatno je čak i nešto precenjeno, pošto je u razmatranom periodu u nekoliko mrežnih područja bila primenjena zemljospojna zaštita, koja je zbog usvojenih vremenskih podešenja isključivala i znatan broj prolaznih zemljospojeva. Tako brojka 9,58 iz Tabele 8.12 već obuhvata i izvestan broj prolaznih zemljospojeva. Faktor 1,3 bi stoga trebalo primeniti na stvarni broj neprolaznih kvarova, koji je nešto manji od 9,58.

Kako se vidi iz Tabele 8.12, dvostruki zemljospojevi i drugi višestruki kvarovi čine sigurno manje od 5,5% kvarova u mreži. Budući da se čak i procenat viši od 5% za ovakve kvarove smatra normalnim i kod brižljivo kompenzovanih mreža (Sl. 8.11, Tabela 8.6, 8.7), može se konstatovati da je situacija u beogradskoj mreži 10 kV i u ovom pogledu zadovoljavajuća.

9. UTICAJ NAČINA UZEMLJENJA NEUTRALNE TAČKE NA POUZDANOST I EKONOMIČNOST MREŽE

Način uzemljenja neutralne tačke distributivnih mreža i vrsta primenjene zaštite od zemljospojeva osetno utiču na broj isključenja potrošača i trajanja prekida isporuke električne energije usled vremena potrebnog za nalaženje kvara, opravku ili eventualno prebacivanje na rezervno napajanje.

Način uzemljenja i zaštite utiče i na investicione i eksploatacione godišnje troškove mreže s obzirom na cenu ugrađenih uređaja i potrebnih izmena i rekonstrukcija u mreži, odnosno troškove vezane za otklanjanje kvarova i opravke ili zamenu oštećenih delova.

U narednim razmatranjima razvijaju se matematički modeli za analizu pouzdanosti i godišnjih troškova distributivnih mreža, kablovskih i vazdušnih, za različite načine uzemljenja neutralne tačke i tehnike zaštite, signalizacije i manipulacije [73, 105]. Pomenuti modeli su orijentacionog karaktera jer počivaju na približnim podacima o broju i strukturi kvarova kao i na izvesnim pretpostavkama o uticaju koji pojedini faktori imaju na njih. Navedeni parametri mogu se približno usvajati na osnovu postojećih podataka o različitim mrežama tako da se sme smatrati da date relacije omogućavaju zadovoljavajuće procene pouzdanosti i ekonomičnosti, pogotovo kada se koriste za uporedne analize.

9.1. UČESTANOST I STRUKTURA KVAROVA

Broj kvarova različite vrste zavisi od niza činilaca, specifičnih za svaku mrežu. Pored načina uzemljenja i primenjene zaštite i signalizacije koji određuju visinu i trajanje prenapona pri jednofaznim zemljospojevima, sastava mreže u pogledu udela vazdušnih i kablovskih vodova, kao i ukupne dužine galvanskih povezanih vodova, na učestalost i strukturu kvarova utiče i vrsta i izolacioni nivo ugrađene opreme, kvalitet izvođenja kablovskih spojnica i završnica, tip kablova, vrste stubova i izolatora, kao i osobenosti pojedinih drugih rešenja u pogledu opreme i dispozicije postrojenja. Kod vazdušnih vodova odlučujući uticaj ima nivo atmosferskih pražnjenja u oblastima kroz koje prolazi trasa i održavanje vodova i trase. Zato se o verovatnom broju i strukturi kvarova u konkretnoj mreži može samo orijentaciono zaključivati prema podacima o drugim mrežama, navedenim u literaturi.

Najispravnija polazna procena u pogledu kvarova dobija se na osnovu iskustvenih podataka o samoj razmatranoj mreži. Ovi podaci u kombinaciji sa postojećim informacijama o mrežama koje rade u sličnim uslovima, uz dopunsku teorijsku analizu mogućih uticaja bitnih faktora, mogu da posluže za prognozu broja i strukture kvarova u posmatranoj mreži, kako pri njenom daljem proširenju, tako i, približno, u slučaju promene načina uzemljenja.

Ukupan broj jednofaznih zemljospojeva u mreži u toku godine jednak je:

$$f_z = f_{pz} + f_{tz} + f_{zk}. \tag{9.1}$$

U (9.1) simbol f označava broj kvarova određene vrste u posmatranoj mreži u toku jedne godine, tj. učestanost kvarova. Indeksi *pz*, *tz* i *zk* odnose se na prolazne jednofazne zemljospojeve, trajne jednofazne zemljospojeve i jednofazne zemljospojeve koji su prešli u kratki spoj na mestu kvara, respektivno.

Može se napisati:

$$f_{pz} = m_p f_z \tag{9.2}$$

$$f_{tz} = m_t f_z \tag{9.3}$$

$$f_{zk} = m_k f_z. \tag{9.4}$$

Koeficijenti m ukazuju na relativni udeo prolaznih, trajnih i zemljospojeva koji prelaze u kratak spoj u ukupnom broju ovakvih kvarova.

Broj f_z približno linearno raste sa ukupnom dužinom vodova mreže ako ova zadržava nepromenjenu strukturu, gradi se sa istom ili sličnom opremom i ne menja način uzemljenja neutralne tačke:

$$f_z = f_{z1} \frac{l}{l_1}. \tag{9.5}$$

U (9.5) je sa f_{z1} označen broj kvarova pri postojećoj dužini vodova l_1, poznat na osnovu pogonskog iskustva.

Na osnovu podataka iz [18, 104, 51], navedenih u Pogavlju 8, koji obuhvataju potpuno prolazne zemljospojeve, kao i na osnovu ostalih podataka iz Poglavlja 8, za karakteristične činioce u (9.2) do (9.4) mogle bi se, u proseku, usvojiti vrednosti iz Tabele 9.1. Kod rubrika sa dva podatka, gornji se odnosi na kablovsku, a donji na vazdušnu mrežu.

Kod izolovanih mreža uslovi samogašenja zemljospoja zavise od vrednosti struje zemljospoja. Granične struje u tom pogledu nalaze se, prema sl. 3.12, orijentaciono u intervalu 40÷60 A.

Broj dvostrukih zemljospojeva raste približno srazmerno kvadratu ukupne dužine vodova [24], tako da se može uzeti:

$$f_{dz} = f_{dz1} \left(\frac{l}{l_1} \right)^2. \tag{9.6}$$

Broj zemljospojeva u kablovskim mrežama uslovljen je nivoom unutarnjih prenapona, njihovom učestalošću i trajanjem. Odlučujućim se faktorom ovde ipak moraju smatrati očekivane maksimalne vrednosti prenapona, posebno u slučaju jednofaznih zemljospojeva koji su obično kritični u ovom pogledu. Ovakvi kvarovi dovode vremenom do manjeg ili većeg oštećenja izolacije na različitim mestima u

mreži koja predstavljaju latentne izvore zemljospojeva u daljem radu. Drugim po vrednosti faktorom treba smatrati vreme trajanja pogona sa jednofaznim zemljospojem, mada je ovo od većeg praktičnog značaja u pogledu pojave dvofaznih zemljospojeva.

TABELA 9.1

Mreža		Struja jednofaznog zemljospoja	m_t	m_k	m_p
Izolovana		$<40 \div 60$ A	0,25 0,03	0,05 0,02	0,7 0,95
		$>40 \div 60$ A	0,7	0,1	0,2
Kompenzovana		—	0,1 0,02	0 0,01	0,9 0,97
Uzemljena preko male impedanse	Sa brzim i sporim APU	—	*) 0,05	*) 0	*) 0,95
	Sa brzim APU	—	*) 0,15	*) 0	*) 0,85

*) za kablovske mreže nema podataka

U prvoj približnosti se može računati da će učestanost zemljospojeva u određenoj kablovskoj mreži, koja je radila izolovano, posle primene kompenzacije ili uzemljenja preko male impedanse biti jednaka

$$f_z^k = f_z^i \left(\frac{k_{mk}}{k_{mi}} \right)^\alpha, \tag{9.7}$$

$$f_z^u = f_z^i \left(\frac{k_{mu}}{k_{mi}} \right)^\alpha. \tag{9.8}$$

U (9.7) i (9.8) indeksi »*i*«, »*k*« i »*u*« odnose se na izolovanu, kompenzovanu i uzemljenu mrežu, respektivno. Simbolom »k_m« označeni su očekivani maksimalni faktori prenapona u različito uzemljenoj mreži.

U vazdušnim mrežama većina jednofaznih zemljospojeva posledica je prenapona atmosferskog porekla, naročito kad vodovi nemaju zaštitne provodnike, što je vrlo često slučaj. Korelacije oblika (9.7) i (9.8) odnosile bi se stoga samo na deo zemljospojeva prouzrokovanih unutarnjim prenaponima i normalnim pogonskim naponom. Za vazdušne vodove moglo bi se, prema tome, pisati:

$$f_z^k = f_{zA} + f_{zU}^i \left(\frac{k_{mk}}{k_{mi}} \right)^\alpha \tag{9.9}$$

$$f_z^u = f_{zA} + f_{zU}^i \left(\frac{k_{mn}}{k_{mi}} \right)^\alpha \tag{9.10}$$

gde se indeks »*A*« odnosi na kvarove od prenapona atmosferskog porekla a indeks »*U*« na kvarove od unutarnjih prenapona. U mnogo slučajeva zbog $f_{zA} \gg f_{zU}$ moći će se zanemariti drugi članovi u (9.9) i (9.10).

U (9.7) do (9.10) može se, u prvoj približnosti, u nedostatku dovoljnog broja odgovarajućih podataka, usvojiti $\alpha \approx 1$.

Između brojeva dvostrukih zemljospojeva u istoj mreži pri različtim načinima uzemljenja mogla bi, grubo uzev, postojati korelacija:

$$f_{dz}^{k} = f_{dz}^{i} \left(\frac{k_{mk} + k_{sk}\, t_k}{k_{mi} + k_{si}\, t_i} \right)^{\beta}, \tag{9.11}$$

$$f_{dz}^{u} = f_{dz}^{i} \left(\frac{k_{mu} + k_{su}\, t_u}{k_{mi} + k_{si}\, t_i} \right)^{\beta}. \tag{9.12}$$

U (9.11) i (9.12) je sa k_s označen koeficijent stacionarnog prenapona, a sa t dužina trajanja rada mreže sa jednofaznim zemljospojem izražena u časovima.

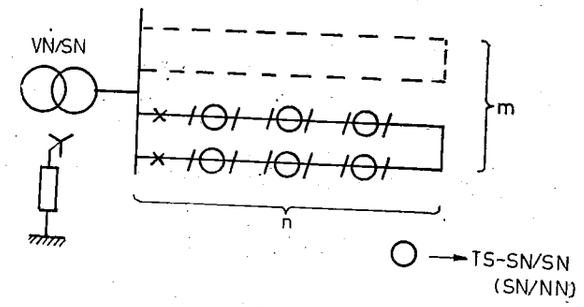
Na osnovu ograničenog broja podataka koji stoje na raspolaganju parametar β ima vrednosti bliske 2.

Relacije (9.7) do (9.12) su heurističke i formirane su na osnovu procene najbitnijih činilaca od uticaja prema postojećim pogonskim i eksperimentalnim podacima. Tačniji oblik pomenutih zavisnosti mogao bi se dobiti statističkom analizom pogona mreža u dužem periodu.

9.2. KABLOVSKE MREŽE

Analiziraće se model prikazan na sl. 9.1.

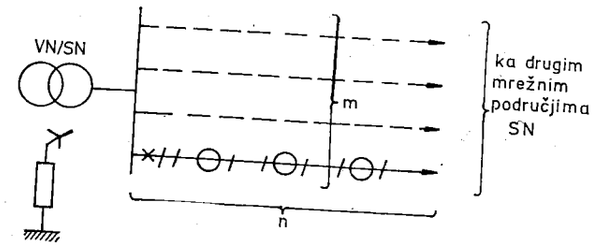
Mreža srednjeg napona je po pretpostavci radijalna i radi sa omčama otvorenim na granici vodova. Prosečan broj TS-SN/NN (TS-SN/SN) po vodu je n, instalisana snaga po TS je S, a ukupan broj vodova u mrežnom području m.



Sl. 9.1

Posebno će se ispitati slučaj kada u mreži postoji mogućnost napajanja svih TS-SN/NN sa obe strane, kao i kada ovakvih rezervi u mreži nema.

Modelu mreže sa sl. 9.1 u svemu je sa stanovišta pouzdanosti ekvivalentan model na sl. 9.2 koji se takođe često primenjuje.



Sl. 9.2

9.2.1. VEROVATNO NEISPORUČENA ENERGIJA USLED ZEMLJOSPOJEVA

Mreže sa izolovanom neutralnom tačkom

Neisporučena energija usled prolaznih jednofaznih zemljospojeva kod mreža sa izolovanom neutralnom tačkom jednaka je:

$$W_{pz} = 0. \tag{9.13}$$

Trajni jednofazni zemljospojevi dovode do prekidanja napajanja kod svih mreža kod kojih je predviđena bilo signalizacija, bilo isključenje ovakvih kvarova. Iznos neisporučene energije pri otklanjanju navedenih kvarova zavisi od vrste primenjene signalizacije i zaštite.

Kod mreža sa neselektivnom signalizacijom zemljospojeva do prekida napajanja dolazi pri traženju voda u kvaru i pri njegovoj eliminaciji.

Neisporučena energija usled traženja voda u kvaru može se, ako se najverovatnijim smatra da će vod u kvaru biti nađen posle $m/2$ manipulacija isključenja i uključenja, izračunati kao:

$$W_{Vtz} = f_{tz}^{i}\, t_{Vm}\, \frac{m}{2}\, n\, \beta\, S. \tag{9.14}$$

U (9.14) je:

t_{Vm} — Vreme trajanja manipulacija isključenje—uključenje voda pri traženju voda u kvaru,

β — koeficijent ravnomernosti opterećenja TS-SN/NN u toku godine, $\beta = \frac{P_{sr}}{S}$,

P_{sr} — srednje radno opterećenje TS-SN/NN u toku godine.

Iznos neisporučene energije usled traženja mesta kvara na vodu i njegovog otklanjanja zavisi od primenjenog postupka za traženje kvara i od toga da li postoji

mogućnost rezervnog napajanja TS-SN/NN koje se nalaze iza mesta kvara, računato od izvora napajanja.

Ako se deonica voda u kvaru utvrđuje sukcesivnim delenjem voda »na pola« uz merenje otpornosti izolacije faznih provodnika na deonicama, što se obično radi da bi se izbegla manipulacija isključenja struja zemljospojeva rastavljačima u vodu, onda je broj potrebnih merenja »k« određen relacijom

$$2^k = n, \tag{9.15}$$

odakle se izračunava

$$k = \left[\frac{\log n}{\log 2}\right]. \tag{9.16}$$

Relacija (9.16) označava da k treba dati vrednost celog broja najbližeg iznosu $\log n/\log 2$. Broj merenja »k« u realnim uslovima može da bude jednak bilo najbližem manjem, bilo najbližem većem celom broju.

Ako postoji mogućnost potpunog rezerviranja TS-SN/NN iza mesta kvara, neisporučena energija usled traženja i otklanjanja mesta u kvaru na vodovima biće:

$$W_{tz} = f^i_{tz}\left\{[(k-1)\,t_p + k t_m]\,\frac{n}{2} + \left(\frac{t_1}{2} + t_m\right)\frac{n}{2}\right\}\beta S \tag{9.17}$$

$$= f^i_{tz}\,\frac{1}{2}\left[\frac{t_1}{2} + k\,(t_p + t_m) + t_m - t_p\right]\beta n S. \tag{9.18}$$

U (9.18) je:

t_1 — vreme potrebno za odlazak od sredine na kraj voda i priključivanje na rezervno napajanje;

t_p — srednje vreme puta između TS kod kojih se vrši merenje otpornosti izolacije;

t_m — vreme potrebno za sekcioniranje voda u TS i merenje otpornosti izolacije.

Prvi od članova u velikoj zagradi u (9.17) odnosi se na polovinu voda na kojoj je kvar, a drugi na ispravnu polovinu voda. Pri sastavljanju izraza (9.17) pošlo se od pretpostavke da se vod u kvaru drži u pogonu do dolaska ekipe do polovine voda. U slučaju da je kvar na polovini voda prema izvoru napajanja, ispravni deo voda moći će se priključiti pod napon posle isteka vremena t_1, potrebnog za dolazak na mesto priključivanja na rezervno napajanje. Ako je kvar na drugoj polovini voda, prva polovina moći će se uključiti sa strane izvora odmah, praktično bez prekida pogona. U srednjem je znači vreme stavljanja pod napon ispravne polovine voda $t_1/2$. Ovom vremenu treba dodati vreme t_m koliko je potrebno za merenje i manipulacije u TS na sredini voda.

Ukupno vreme u toku koga su bez napona TS na polovini voda sa kvarom približno je jednako vremenu utrošenom na putu između TS na pomenutoj polovini voda pri otkrivanju deonice u kvaru, koje iznosi $(k-1)\,t_p$. Ovom vremenu treba još dodati ukupno vreme utrošeno na merenje, kt_m. Pri tom nije uračunato vreme potrebno za uključivanje delova posmatrane polovine voda na napon, posle otkrivanja deonice u kvaru, ali isto tako nisu obuhvaćene ni uštede u vremenu koje se dobijaju u slučaju sukcesivnog uključivanja na napon ispravnih deonica posmatrane polovine

voda još u toku traženja kvara. Smatralo se da se pomenuta dva efekta približno međusobno kompenzuju.

Kada ne postoje tehničke mogućnosti za rezerviranje TS-SN/NN, energija W_{tz} će biti, ako se u proseku najverovatnijim smatra kvar na sredini voda:

$$W_{tz} = f^i_{tz}\left\{[(k-1)\,t_p + k t_m]\,\frac{n}{2} + (t_m + t_0)\,\frac{n}{2}\right\}\beta S. \tag{9.19}$$

odnosno

$$W_{tz} = \frac{1}{2}\,f^i_{tz}\,[k\,(t_p + t_m) + t_0 + t_m - t_p]\,\beta n S. \tag{9.20}$$

U (9.19) i (9.20) je sa t_0 označeno prosečno vreme opravke kvara na kablu.

Prvi član u izrazu (9.19) predstavlja srednje vreme ostavljanja van pogona TS zbog traženja kvara, za slučaj da je kvar neposredno levo ili desno od sredine voda.

Kod mreža sa selektivnom signalizacijom zemljospojeva je

$$W_{Vtz} = 0. \tag{9.21}$$

Energija W_{tz} se i kod ovih mreža računa prema izrazima (9.18) i (9.20).

Da bi se ustanovilo da li je kvar trajnog karaktera isključeni vod se obično ponovo stavlja pod napon. Kvar se traži i otklanja samo ako se i dalje konstatuje kvar. Pri tom se primenjuje isti postupak kao kod izolovane mreže bez zemljospojne zaštite.

Neisporučena energija do dolaska remontne ekipe u izvornu TS iznosi:

$$W_z = f^i_z\,n t_T\,\beta S, \tag{9.22}$$

gde je sa t_T označeno vreme dolaska do izvorne TS.

Energija koja se gubi ako je kvar stabilan, za rezervirane mreže može se izračunati kao:

$$W_{tz+kz} = (f^i_{tz} + f^i_{zk})\left\{t_1 n + [(k-1)\,t_p + k t_m]\,\frac{n}{2} + \left(t_m + \frac{t_1}{2}\right)\frac{n}{2}\right\}\beta S \tag{9.23}$$

ili

$$W_{tz+kz} = \frac{1}{2}\,(f^i_{tz} + f^i_{zk})\,[2{,}5\,t_1 + k\,(t_p + t_m) + t_m - t_p]\,\beta n S. \tag{9.24}$$

U slučaju nemogućnosti rezerviranja, bilo bi:

$$W_{tz+kz} = (f^i_{tz} + f^i_{zk})\left\{t_1 n + [(k-1)\,t_p + k t_m]\,\frac{n}{2} + (t_m + t_0)\,\frac{n}{2}\right\}\beta n S \tag{9.25}$$

odnosno

$$W_{tz+kz} = \frac{1}{2}\,(f^i_{tz} + f^i_{zk})\,[2\,t_1 + k\,(t_p + t_m) + t_m + t_0 - t_p]\,\beta n S. \tag{9.26}$$

Ako se u mreži primenjuje brzo APU, energija W_z zanemarljivo je mala. Kod sporog APU W_z se može izračunati tako što se u (9.22) umesto t_T uvrsti vreme trajanja beznaponske pauze, t_{PU}.

Relacije (9.22) do (9.25) mogu se upotrebiti i za proračun neisporučene energije usled zemljospojeva prešlih u kratke spojeve kod izolovanih mreža sa signalizacijom zemljospojeva. Pri tom u navedene formule treba uvrstiti učestanost odgovarajućih kvarova.

Pouzdanost rada mreže osetno je ugrožena pojavom dvostrukih zemljospojeva. Može se smatrati da je ukupno vreme za nalaženje i otklanjanje dvostrukog zemljospoja jednako zbiru vremena potrebnog za otklanjanje jednog jednostrukog kratkog spoja i jednog trajnog zemljospoja. Ako se usvoji ova pretpostavka, ima se:

$$W_{dz}=f^i_{dz}\left(\frac{W_{zk}}{f^i_{zk}}+\frac{W_{tz}}{f^i_{tz}}+\frac{W_z}{f^i_z}\right). \tag{9.27}$$

Preko poslednjeg člana u (9.27) obuhvata se izgubljena energija do dolaska osoblja u izvornu TS.

Kompenzovane mreže

Kod kompenzovanih mreža nema, kao ni kod izolovanih mreža sa signalizacijom, prekida pogona usled prolaznih zemljospojeva tako da se ovde može primeniti relacija (9.13).

U analizi posledica trajnih zemljospojeva kod kompenzovanih mreža treba voditi računa o primenjenoj signalizaciji i tehnici isključivanja zemljospojeva. U slučaju primene neselektivne signalizacije, do prekida isporuke energije dolazi, isto kao i kod izolovanih mreža, pri traženju voda u kvaru i pri lokalizaciji mesta u kvaru. Tako se za proračune neisporučene energije i u ovom slučaju mogu koristiti formule (9.14), (9.18) i (9.20) sa učestanošću kvarova f^k_{tz} karakterističnom za kompenzovane mreže. Razmatrani način signalizacije zemljospojeva retko se primenjuje pošto zahteva veliki broj manipulacija u mreži, koje mogu da budu praćene prenaponima.

U slučaju primene selektivne signalizacije zemljospojeva važi sve što je rečeno za izolovane mreže sa ovom tehnikom. Neisporučena energija usled jednofaznih zemljospojeva preraslih u kratke spojeve i dvostrukih zemljospojeva takođe se može odrediti na osnovu realcija (9.22) do (9.27) kada se u ove uvrste karakteristične vrednosti za f^k_{kz} i f^k_{dz} za razmatranu vrstu pogona mreže i primenjeni način signalizacije i zaštite.

Kod mreža sa zemljospojnom zaštitom ili tehnikom kratkotrajnog niskoomskog premošćenja prigušnice, primenjuju se izrazi izvedeni za izolovanu mrežu za zemljospojnom zaštitom. Ovo se odnosi na sve vrste razmatranih kvarova.

Mreže uzemljene preko male impedanse

Kod mreža uzemljenih preko male impedanse može se primeniti isti postupak za otklanjanje kvara kao kod izolovanih mreža sa zemljospojnom zaštitom. Za proračun neisporučene energije koriste se tada relacije (9.22) do (9.26) pri čemu se umesto f^i_z i $f^i_{tz}+f^i_{kz}$ uvrštavaju parametri f^u_z i f^u_{kz}, respektivno. U slučaju kada ne postoji APU, za f^u_{kz} treba uvrstiti vrednost koja odgovara sporom APU budući

da se vod probno uključuje posle duge beznaponske pauze potrebne da osoblje dođe u izvornu TS.

U slučaju primene pokazivača kvara na deonicama vodova (Tačka 7.6.2), vremena otkrivanja mesta kvara unekoliko se skraćuju u poređenju sa vremenima u dosada izvedenim izrazima.

Kod primene pokazivača kvarova bez daljinske signalizacije vreme potrebno za eliminaciju deonice voda u kvaru, pošto se utvrdi da je kvar neprolazan, moglo bi se proračunati prema izrazu:

$$t=t_1+(k-1)\,t_p+(k-k_1)\,t_m. \tag{9.28}$$

Pri sastavljanju formule (9.28) pošlo se od pretpostavke da ekipa istim redosledom kao i ranije obilazi TS-SN/NN, s tom razlikom što se otpornost izolacije meri samo u TS kod kojih nisu ugrađeni pokazivači kvarova. Sa k_1 označen je broj TS-SN/NN sa pokazivačima kvara. Kada su pokazivači ugrađeni samo u TS na polovini voda je $k_1=1$, kada su pokazivači ugrađeni i u TS na svakoj četvrtini voda je $k_1=2$, itd.

Ako se primenjuje daljinska signalizacija svih pokazivača na vodu, vreme za traženje kvara bi iznosilo, za $k>k_1$:

$$t=t_V+(k-k_1-1)\,t_p+(k-k_1)\,t_m \tag{9.29}$$

U (9.29) je sa t_V označeno prosečno vreme trajanja puta do prve TS na vodu bez pokazivača kvara.

Kad sve TS-SN/NN imaju pokazivače kvarova sa signalizacijom na daljinu, za isključenje deonice voda u kvaru utrošilo bi se vreme t_p', potrebno ekipi za dolazak u dve TS-SN/NN na krajevima deonice i otvaranje odgovarajućih rastavljača

$$t=t_p'. \tag{9.30}$$

Na osnovu istih pretpostavki o mreži i mestu nastanka kvara, učinjenih pri sastavljanju (9.23) i (9.24), za mreže sa pokazivačima kvara bez signalizacije može se pisati:

$$W_{zk}=f^u_{zk}\left\{t_1\,n+[(k-1)\,t_p+(k-k_1)\,t_m]\,\frac{n}{2}+t_1\,\frac{n}{4}\right\}\beta S=$$

$$=\frac{1}{2}\,f^u_{zk}\,[2{,}5\,t_1+(k-1)\,t_p+(k-k_1)\,t_m]\,\beta\,nS. \tag{9.31}$$

U članu koji pokazuje vreme prekida pogona ispravne polovine izostavljeno je vreme t_m pošto se pretpostavlja da TS na sredini voda ima pokazivač kvara.

Formula (9.31) važi u slučaju mogućnosti rezerviranja. Ako ova mogućnost ne postoji, ima se:

$$W_{zk}=f^u_{zk}\left\{t_1\,n+[(k-1)\,t_p+(k-k_1)\,t_m]\,\frac{n}{2}\,t+t_0\,\frac{n}{2}\right\}\beta S=$$

$$=\frac{1}{2}\,f^u_{zk}\,[2\,t_1+(k-1)\,t_p+(k-k_1)\,t_m+t_0]\,\beta\,nS. \tag{9.32}$$

Saglasno (9.29) i (9.30), u slučaju daljinske signalizacije i postojanja mogućnosti rezerviranja može se napisati:

$$W_{zk}=\begin{cases}\dfrac{1}{2}f^u_{zk}\left[2t_V+\dfrac{t_1}{2}+(k-k_1)(t_p+t_m)-t_p\right]\beta nS & k>k_1\\ f^u_{zk}\left(t_p'+\dfrac{t_1}{4}\right)\beta nS & \text{sve TS-SN/NN imaju pokazivače}\end{cases} \tag{9.33}$$

Kada nema rezerviranja je

$$W_{zk}=\begin{cases}f^u_{zk}\dfrac{1}{2}[2t_V+(k-k_1)(t_p+t_m)-t_p+t_0]\beta nS & k>k_1\\ f^u_{zk}\left(t_p'+\dfrac{t_0}{2}\right)\beta nS & \text{sve TS-SN/NN imaju pokazivače}\end{cases} \tag{9.34}$$

Neisporučena energija usled dvostrukih zemljospojeva mogla bi se približno računati preko formule:

$$W_{dz}=2f^u_{dz}\left(\frac{W_{zk}}{f^u_{zk}}+\frac{W_z}{f^u_z}\right). \tag{9.35}$$

9.2.2. EKSPLOATACIONI I INVESTICIONI TROŠKOVI

Za dobijanje potpunije slike o tehničko-ekonomskim karakteristikama različitih načina uzemljenja mreža treba proceniti investicione i eksploatacione troškove, koji se mogu očekivati u slučaju primene određenog rešenja.

Kod izolovanih mreža sa neselektivnom signalizacijom zemljospoja osnovni eksploatacioni troškovi, uslovljeni načinom uzemljenja neutralne tačke, su oni koji su vezani za sanaciju kvarova usled zemljospojeva. Ovi troškovi u toku jedne godine iznose približno:

$$E_i=[(m_t+m_k)f^i_z+2f^i_{dz}]\,c_0. \tag{9.36}$$

Ovde je c_0 prosečna cena opravke po mestu kvara.

Razmatrano rešenje ne zahteva nikakva posebna investiciona ulaganja.

Kod izolovanih mreža sa selektivnom signalizacijom zemljospojeva imali bi se investicioni troškovi:

$$I_{is}=m(C_{ZR}+C_{ST}). \tag{9.37}$$

U (9.37) je sa C_{ZR} označena cena zemljospojnog relea, a sa C_{ST} cena trećeg ili obuhvatnog strujnog transformatora u izvornoj TS.

Troškovi izolovanih mreža sa brzim selektivnim isključenjem jednofaznih zemljospojeva takođe se određuju prema (9.36) i (9.37), ako se u (9.36) umanji f^i_{dz} zbog kraćeg trajanja zemljospoja (Odeljak 9.1).

Eksploatacioni godišnji troškovi mreže u slučaju primene kompenzacije računaju se prema (9.36), kada se uvrste odgovarajući podaci za učestanost i strukturu kvarova.

Investicioni troškovi kod kompenzacije iznose, ako se, na primer, primenjuje zemljospojna zaštita:

$$I_{k1}=m(C_{ZR}+C_{ST})+C_p. \tag{9.38}$$

Sa C_p označena je cena prigušnice sa pratećom opremom.

Kod kompenzacije sa kratkotrajnim premošćenjem malom impedansom investicioni troškovi bi bili:

$$I_{kz}=m(C_J+C_{ST})+C_p+C_z, \tag{9.39}$$

gde je

C_J — cena prekostrujnog relea

C_z — cena impedanse sa premošćenje, sa neophodnom opremom.

Eksploatacioni troškovi su isti kao kod prethodnog rešenja.

Investicioni troškovi za uzemljenje preko male impedanse iznosili bi:

— ako se ne koriste pokazivači kvarova ni APU

$$I_{u1}=m(C_J+C_{ST})+\frac{C_z}{q} \tag{9.40}$$

— u slučaju primene pokazivača na sredini svakog voda

$$I_{u2}=I_{u1}+m(C_{ST}+C_{PK}) \tag{9.41}$$

— ako se pokazivači ugrađuju u svim prijemnim TS

$$I_{u2}=I_{u1}+mn(C_{ST}+C_{PK}) \tag{9.42}$$

— u slučaju primene APU i pokazivača u svim prijemnim TS

$$I_{u4}=I_{u3}+mC_{APU} \tag{9.43}$$

U (9.40) do (9.43) je označeno:

q — broj transformatora u izvornoj TS koji koriste istu impedansu za uzemljenje,

C_{PK} — ukupna cena ugradnje pokazivača zemljospoja,

C_{APU} — cena uređaja za APU.

Eksploatacioni troškovi izračunavaju se takođe preko (9.36) sa odgovarajućim učestanostima kvarova.

9.2.3. UKUPNI TROŠKOVI

U troškove mreže treba uračunati i štete prouzrokovane poremećajima u isporuci električne energije potrošačima zbog nastalih kvarova. Navedena šteta zavisi u osnovi od količine neisporučene energije i broja prekida napajanja, kao i iznosa nepokrivene snage potrošnje u određenom trenutku [106]. Ako se razmatrane štete procenjuju samo prema neisporučenoj energiji, pomenuta šteta bi iznosila:

$$L=C_N W_N. \tag{9.44}$$

U (9.44) C_N predstavlja štetu po jedinici neisporučene energije, izraženu novčano, a W_N iznos isporučene energije, koja se procenjuje kako je pokazano u 9.2.1.

Ukupni troškovi mreže u veku eksploatacije, zavisni od primenjenog načina uzemljenja neutralne tačke, mogu se izračunati kao:

$$T=I+g_N\,(E+L). \tag{9.45}$$

Relacija (9.45) daje aktualizovane troškove, svedene na vrednosti na početku prve godine eksploatacije [107].

Pri tom je:

$$g_N=\sum_{k=1}^{N}\frac{1}{(1+i)^k}=\frac{(1+i)^N-1}{i\,(1+i)^N}$$

N — vek eksploatacije izražen brojem godina,

$i=\dfrac{p}{100}$

p — stopa aktualizacije,

I — investicioni troškovi,

E — godišnji eksploatacioni troškovi,

L — štete usled zemljospojeva, godišnje.

Pretpostavlja se da se E i L ne menjaju u toku eksploatacionog veka.

Primenom izraza izvedenih u prethodnom razmatranju analizirani su, primera radi, troškovi jedne kablovske mreže 10 kV zavisno od ukupne dužine vodova i načina uzemljenja neutralne tačke i zaštite i signalizacije. Mreža u postojećim uslovima radi kao izolovana sa neselektivnom signalizacijom zemljospoja, a ukupna dužina vodova je $l_1=5$ km. Na osnovu podataka o broju jednofaznih i dvostrukih zemljospojeva u postojećim uslovima, određeni su troškovi mreže pri porastu ukupne dužine vodova uz nepromenjeni način uzemljenja i zaštite. Pomenuto rešenje (varijanta »i_1«), poređeno je prema ukupnim troškovima sa sledećim drugim rešenjima: izolovana neutralna tačka sa zemljospojnom zaštitom (varijanta »i_2«), kompenzacija uz zemljospojnu zaštitu (varijanta »k«), uzemljenje preko male otpornosti (varijanta »u_1«), varijanta »u_1« sa pokazivačima kvara u svim TS srednji/niski napon (varijanta »u_2«), i varijanta u_1 sa APU (varijanta »u_3«). Karakteristični parametri usvojeni su prema Tabeli 9.1 i Tabeli 9.2. Sve cene se odnose na 1978. god.

Pošlo se od pretpostavke da je mreža praktično potpuno rezervirana i da prosečna radna snaga po prijemnoj TS iznosi $\beta\,S=215$ kW.

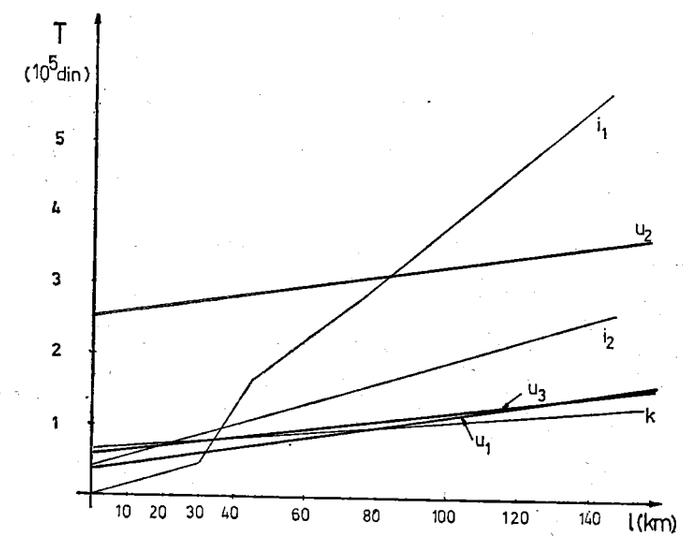
Na slici 9.3 prikazani su rezultati proračuna uz pretpostavku da su štete usled neisporučene energije jednake ceni energije, $C_N=0{,}7$ din/kWh, što svakako predstavlja donju granicu ovih troškova.

Slika 9.4 daje troškove razmatranih varijanti mreže za $C_N=15$ din/kWh, čime se štete usled poremećaja napajanja realnije obuhvataju.

Sa slika 9.3 i 9.4 vidi se da je varijanta »i_1« najekonomičnija pri dužinama mreže do reda 20÷30 km kod kojih se još uvek može očekivati samogašenje jednofaznih zemljospojeva. Pri većim dužinama naglo raste broj jednofaznih zemljospojeva koji su trajni ili prelaze u kratak spoj, kao i broj dvostrukih zemljospojeva.

TABELA 9.2

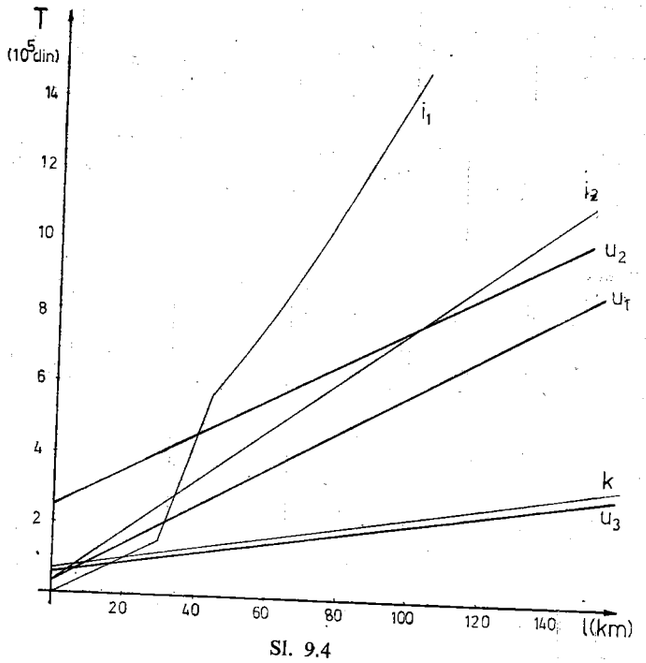
Vremena (minuti)							
t_p	t_m	t_{Vm}	t_1	t_0	t_T	t_V	t_p'
15	15	5	20	300	40	40	50
Faktori prenapona							
k_{mi}	k_{mk}	k_{mu}	k_{si}	k_{sk}	k_{su}		
3	2,6	2	1,73	1,73	1,8		
Cene (10^3 dinara)							
c_0	C_{ST}	C_{ZR}	C_p	C_{APU}	C_J	C_z	C_{PK}
8	1,8	2,2	50	2,5	0,5	30	2,5
Ostalo							
l_1 (km)	f^i_{z1}	f^i_{dz1}	m	n	q	N	p
5	0,3	$1{,}25\cdot10^{-4}$	10	5	2	20	10



Sl. 9.3

Približno jednako ekonomičnim pri $C_N=0{,}7$ din/KWh mogu se kod svih dužina mreža smatrati rešenja u_1, u_3 i k. U proračunima je učinjena pretpostavka da je kompenzacija tačna pri svim dužinama mreže tako da se ima vrlo mali broj

stabilnih kvarova. Rešenja u_1 i u_3 odlikuju se niskim eksploatacionim troškovima i malim troškovima usled neisporučene energije zbog malog broja kvarova svih vrsta. Pomenutu odliku ima i varijanta u_2 no ova zahteva znatne investicije.



Sl. 9.4

Kod C_N=15 din/kWh na ekonomičnost pojedinih rešenja osetno utiče iznos neisporučene energije. Prednost u ovom pogledu imaju varijante u_3 i k. Kod rešenja u_1, u_2 i i_2 imaju se povećani troškovi usled neisporučene energije do dolaska remontne ekipe (energija W_z) pošto se svaki zemljospoj trenutno isključuje bez obzira na prirodu kvara.

Preko ekonomskih parametara ne mogu se ipak obuhvatiti mnogi tehnički aspekti koji često osetno utiču kod opšte ocene rešenja. Primera radi, u proračunima za varijantu u_3 pošlo se od pretpostavke da postojeći prekidači mogu da podnesu APU. Ako to nije slučaj, rešenje u_3 zahtevalo bi zamenu prekidača usled čega bi se povećali investicioni troškovi. U proračunima, pored toga, nisu obuhvaćeni ni troškovi zbog bržeg starenja prekidača usled povećanog broja operacija. U odnosu na varijantu k treba imati u vidu teškoće koje se mogu očekivati sa zemljospojnom zaštitom i regulacijom prigušnice.

Varijanta i_1, isto tako, često neće moći da se primeni u gradskim mrežama zbog uslova uzemljenja, ako se ne obezbedi blagovremeno otklanjanje jednofaznih zemljospojeva (Odeljak 6.7).

Ekonomičnost varijanti k i u_3 posledica je malog broja kvarova koji zahtevaju opravke. Kod uzemljenja preko male impedanse pretpostavljeno je da se svega 20% zemljospojeva neće moći eliminisati brzim i sporim APU. Pomenuta pretpostavka je možda optimistička za kablovske mreže, pošto znatne struje zemljospoja otežavaju gašenje kvara u beznaponskim pauzama kod kvarova na kablovima.

9.3. VAZDUŠNE MREŽE

Kod vazdušnih mreža zbog velikog procenta prolaznih zemljospojeva obično se, u slučaju uzemljenja neutralne tačke preko male impedanse, primenjuje zaštita sa APU. Primena APU dolazi takođe u obzir i kod izolovanih mreža sa zemljospojnom zaštitom. U nekim slučajevima može se u pomenutim mrežama primeniti i automatski tragač kvarova kao zamena za selektivnu signalizaciju ili zaštitu, kako je pokazano u 7.4.2.

U analizama troškova pretpostavićemo da se vazdušne mreže ne mogu rezervirati, tako da svaki trajni kvar dovodi do prekida napajanja svih prijemnih TS iza mesta kvara, računato od izvorne TS.

Karakteristični troškovi mreže u slučaju uzemljenja preko male impedanse uz APU jednaki su, u analogiji sa odgovarajućim izrazima za kablovsku mrežu,

$$I_{u1}=\frac{C_z}{q}+m\,(C_J+C_{ST}+C_{APU})+k_1\,l\,\Delta\,C_s+mn\,\Delta\,C_{TS} \tag{9.46}$$

$$E_{u1}=(f^u_{tz}+2f^u_{dz})c_0 \tag{9.47}$$

$$L_{u1}=\frac{1}{2}\,(f^u_{tz}+2f^u_{dz})\,\{[2\,(t_T+t_t)+t_0]+f^u_{zII}\,t_{II}\}\,\beta\,n\,SC_N. \tag{9.48}$$

U (9.46) do (9.48) je:

k_1 — broj stubova kod kojih su potrebni radovi radi zaštite od opasnih napona, po 1 km dužine voda,

$\Delta\,C_s$ — troškovi radova kod stubova,

$\Delta\,C_{TS}$ — troškovi radova na uzemljenju prijemne TS,

f^u_{zII} — broj delovanja drugog stepena APU, godišnje,

t_{II} — trajanje duge beznaponske pauze kod APU,

t_t — vreme potrebno za nalaženje mesta kvara.

Ostali simboli imaju isto značenje kao u 9.2.1.

U (9.46) je učinjena pretpostavka da su, pošto izostaju povoljni uticaji kablovskih vodova, potrebni dodatni radovi na uzemljenju prijemnih TS. U slučaju postojanja zaštitne užadi na napojnim vodovima ili kada su povoljni uslovi uzemljenja u pripadajućim mrežama nižeg napona, navedeni radovi neće biti potrebni (Odeljak 6.8). Kod sastavljanja izraza (9.48) učinjena je pretpostavka, isto kao kod kablovskih mreža, da se kvar u proseku nalazi na sredini voda.

Investicioni troškovi u slučaju primene uzemljenja preko male impedanse bez APU iznose:

$$I_{u2}=I_{u1}-m\,C_{APU}. \tag{9.49}$$

Eksploatacioni troškovi mogu se izračunati prema (9.47), a štete usled neisporučene energije prema (9.48), ako se umesto f^u_{zII} stavi $m_p f^u_z$ i t_{II} zameni sa t_T.

Za izolovanu mrežu sa neselektivnom signalizacijom investicioni troškovi se mogu zanemariti. Eksploatacioni troškovi određuju se prema (9.36).

Štete usled neisporučene energije biće u razmatranom slučaju, saglasno (9.14), (9.27) i (9.48):

$$L_{i1}=\frac{1}{2}\{(f^i_{tz}+f^i_{dz})\,mt_{ym}+(f^i_{tz}+f^i_{dz})\,(t_0+t_t)+$$

$$+(f^i_{zk}+f^i_{dz})\,[2\,(t_T+t_t)+t_0]\}\,n\,\beta\,SC_N \qquad (9.50)$$

Investicioni troškovi za izolovanu mrežu sa automatskim tragačem kvarova i APU bili bi:

$$I_{i2}=C_{tk}+m\,C_{APU} \qquad (9.51)$$

gde C_{tk} predstavlja cenu tragača kvarova (Tačka 7.4.2).

Eksploatacioni troškovi računali bi se prema opštoj relaciji (9.36).

Šteta usled neisporučene energije iznosi, s obzrom na (9.14) i (9.27),

$$L_{i2}=\frac{1}{2}\{(f^i_{zII}+f^i_{dz})\,mt_{II}+(f^i_{tz}+f^i_{zk}+f^i_{dz})\,[2\,(t_T+t_t)+t_0]\}\,n\,\beta\,SC_N. \qquad (9.52)$$

Prvi član u (9.52) odnosi se na prekide pogona pri traženju voda u kvaru. Pretpostavljeno je da se u proseku kvar otkriva posle m/2 isključenja vodova.

Investicioni troškovi izolovane mreže sa zemljospojnom zaštitom i APU jednaki su:

$$I_{i3}=m\,(C_{ZR}+C_{ST}+C_{APU}). \qquad (9.53)$$

Eksploatacioni troškovi mogli bi se računati prema (9.36), a štete nastale usled neisporučene energije prema (9.48), ako se učestanosti kvarova za uzemljenu mrežu zamene odgovarajućim za izolovanu mrežu.

Investicioni troškovi za kompenzovane mreže sa zemljospojnom zaštitom, na primer, određuju se prema (9.38), a eksploatacioni prema (9.36) sa odgovarajućim učestanostima kvarova. Štete usled neisporučene energije bile bi:

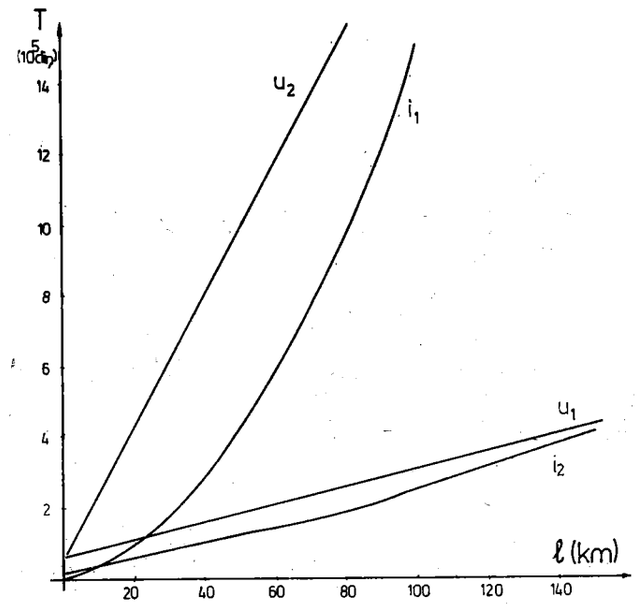
$$L_k=\frac{1}{2}\,[(m_t+m_k)f_z{}^k+2f^k_{dz}]\,[2\,(t_T+t_t)+t_0]n\,\beta\,SC_N. \qquad (9.54)$$

Na sl. 9.5 pokazani su, primera radi, ukupni troškovi za vazdušne mreže 10 kV Beograda uz pretpostavku da su štete usled prekida pogona jednake ceni neisporučene energije, C_N=0,7 din/kWh.

Proračuni su izvedeni za slučajeve kada je mreža izolovana sa isključivo signalizacijom zemljospoja (varijanta i_1), izolovana, sa automatskim tragačem kvarova i APU (varijanta i_2) i uzemljena preko male impedanse sa APU (varijanta u_1) i bez APU (varijanta u_2). Parametri na osnovu kojih su vršeni proračuni dati su u Tabeli 9.3. Ostali parametri usvojeni su prema Tabeli 9.1 i 9.2. Cene se odnose na 1978. god.

Pretpostavljena radna snaga TS srednji-niski napon je 120 kW. Smatra se da ne postoje uslovi za rezervno napajanje isključenih potrošača.

Kako se vidi sa sl. 9.5, varijanta i_1 konkurentna je rešenjima i_2 i u_1 kod manjih ukupnih dužina vodova mreže. Kod dužina iznad reda 20—30 km pomenuta varijanta je manje ekonomična zbog prekida pogona usled dvostrukih zemljospojeva. Varijanta u_2 se pokazuje kao manje ekonomična od ostalih rešenja kod svih l.



Sl. 9.5

Pretpostavljene učestanosti kvarova relativno su visoke, što daje osetnu prednost rešenjima u_1 i i_2. Razlike između razmatranih varijanti bile bi manje kod manjeg f^i_{z1}, a naročito f^i_{dz1}.

TABELA 9.3

vremena (h)				cene (10^3 din)		
t_T	t_t	t_0	t_{II}	C_{tk}	c_0	C_{TS}
2	1	3	0,05	2,5	2	7,5
parametri mreže						
l_1 (km)	f^i_{z1}	f^i_{dz1}	n	m	k_1	q
10	15	0,15	5	5	0	1

10. PRAKSA RAZLIČITIH ZEMALJA U OBLASTI UZEMLJENJA NEUTRALNE TAČKE

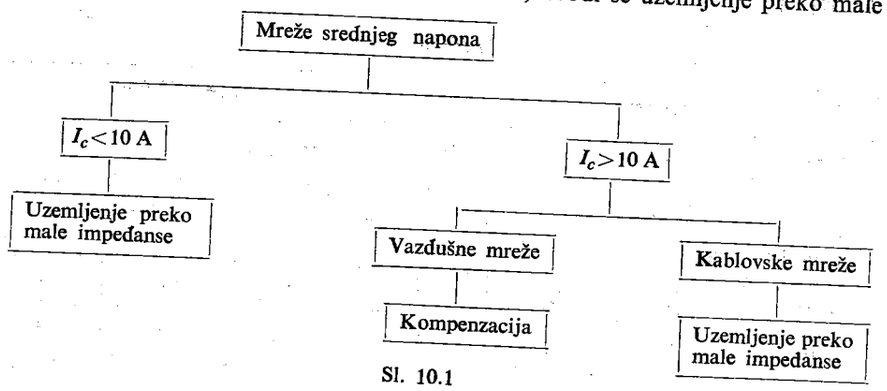
10.1. DR NEMAČKA

Propisi DR Nemačke za koordinaciju izolacije mreža visokog napona TGL-20445 predviđaju sve osnovne načine uzemljenja neutralne tačke:

— primenu kompenzacionih prigušnica,
— uzemljenje preko male impedanse (»niskoomsko uzemljenje«),
— direktno uzemljenje.

Najveći broj mreža srednjeg napona radi sa izolovanom neutralnom tačkom ili je kompenzovano. Uzemljenje preko male impedanse uvodi se postepeno kao osnovno rešenje za nove kablovske mreže. Smatra se da je pogon sa izolovanom neutralnom tačkom opravdan samo ako kapacitivna struja zemljospoja leži u opsegu 10 do 50 A. Donja granica usvojena je da bi se izbegli intermitentni zemljospojevi, a gornja predstavlja najveću struju pri kojoj se još očekuje samogašenje zemljospojeva.

Kod postojećih izolovanih mreža sa kapacitivnim strujama zemljospoja manjim od 10 A, kako kablovskih, tako i vazdušnih, uvodi se uzemljenje preko male



Sl. 10.1

impedanse. Kablovske izolovane mreže sa strujama zemljospoja većim od 50 A takođe se prevode na uzemljenje preko male impedanse. Za vazdušne mreže sa velikim strujama zemljospoja preporučuje se primena kompenzacije. Takođe se

i mnoge kompenzovane mreže, kod kojih je ili prekoračena granica za gašenje struja kvara, ili učestala pojava dvostrukih zemljospojeva, pregrađuju na uzemljenje preko male impedanse [108].

Preporuke za izbor načina uzemljenja u novim mrežama srednjeg napona prikazane su šematski dijagramom na sl. 10.1.

Struju jednofaznog zemljospoja kod uzemljenja preko male impedanse trebalo bi, smatra se, izabrati u opsegu 300÷1500 A.

Kod mreža sa kompenzacijom predviđena je primena automatske regulacije prigušnice i selektivne zemljospojne zaštite.

10.2. ENGLESKA

Engleski propisi predviđaju direktno uzemljenje neutralne tačke, uzemljenje preko otpornika i kompenzacione prigušnice [33]. Prva dva načina uzemljenja su opšte prihvaćena, pri čemu se direktno uzemljenje primenjuje u mrežama napona 132 kV i 275 kV, a preko otpornika u mrežama 66,33,11 i 6,6 kV. Ovde se struje jednofaznih zemljospoja obično ograničavaju na 1.500 A [32]. Mreže 11 i 6,6 kV se izvode i sa direktnim uzemljenjem neutralne tačke, kada se struje zemljospoja ograničavaju samom reaktansom transformatora [34].

Primena kompenzacionih prigušnica zahteva, prema engleskim propisima, posebna razmatranja sa stanovišta strujnog opterećenja uzemljivača i opasnosti od pogona sa prekinutom fazom. Da bi se izbegli dvostruki zemljospojevi, kompenzacione prigušnice se 10 s posle nastanka zemljospoja kratko premošćuju i nastali se kvar prekostrujno eliminiše.

U svim mrežama napona do 66 kV, koje po pravilu rade kao radijalne, uzemljenje neutralne tačke izvodi se samo u jednom postrojenju, obično u napojnoj TS.

Uobičajeni način uzemljenja mreža različitih napona, od generatora do potrošača na niskom naponu, prikazani su šematski na sl. 10.2 [34].

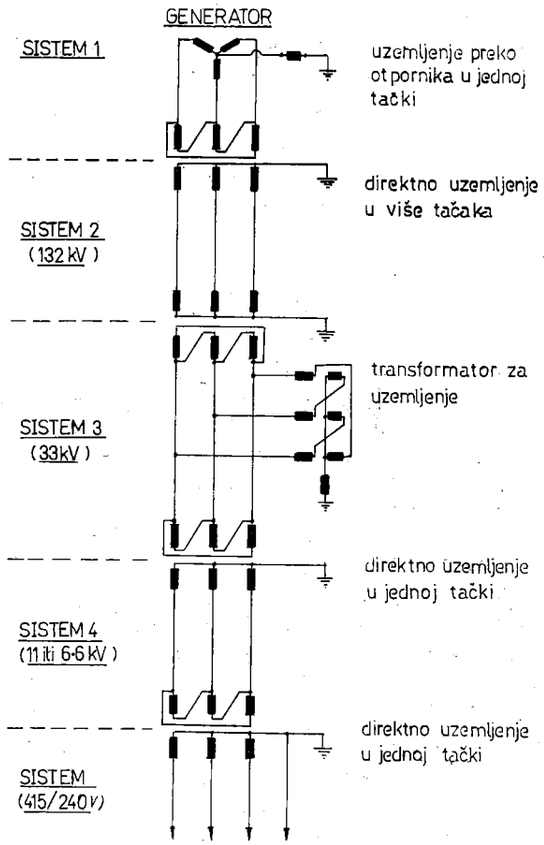
Uzemljenje mreže 33 kV izvedeno je preko transformatora za uzemljenje sa ugrađenim otpornikom.

Na strani 11 kV, odnosno 6,6 kV postoji mogućnost odvajanja neutralne tačke napojnog transformatora od zemlje. Neutralna tačka transformatora se izoluje od zemlje u slučaju eventualnog paralelnog rada sa drugim transformatorom na strani 11 (6,6) kV, koji se inače retko koristi.

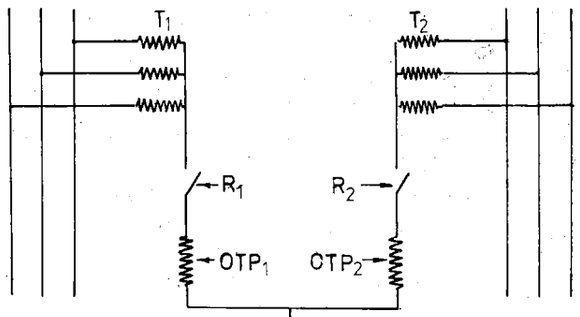
Otpornici za uzemljenje izvode se kao elektrolitski (tečni) i metalni. Elektrolitski otpornik je za engleske uslove mnogo jeftiniji od metalnog, tako da se više primenjuje iako zahteva brižljivije održavanje. Obično se za svaki transformator u transformatorskoj stanici predviđa posebni otpornik. Uobičajeni način vezivanja otpornika prikazan je na sl. 10.3.

Metalni otpornici se obično izvode kao zajednički za sve transformatore u TS (sl. 10.4). Predviđa se mogućnost kratkog prespajanja otpornika u periodu remonta i kontrole.

Otpornici su tako projektovani da podešene struje zemljospoja mogu da podnesu 10 do 30 s.



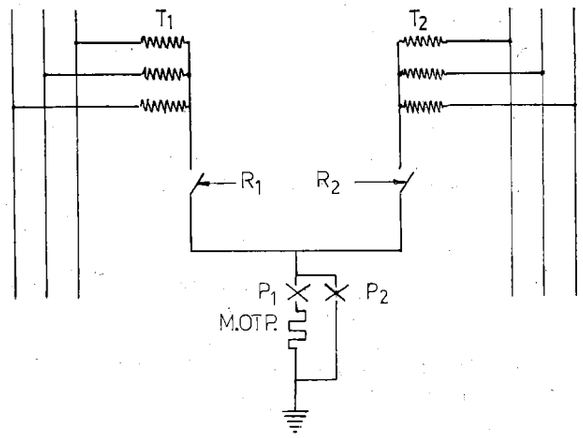
Sl. 10.2



T_1, T_2 — transformatori distributivne mreže
OTP_1, OTP_2 — otpornici
R_1, R_2 — rastavljači

Sl. 10.3

U Engleskoj se kod stubova vazdušnih vodova ne izvode posebni uzemljivači. Smatra se da će prirodni otpori uzemljenja fundamenata čeličnih i armirano-betonskih stubova biti dovoljno niski za reagovanje zaštite u slučaju preskoka na stub ili pada provodnika na konzolu. Kod drvenih stubova se takođe ne izvode posebni uzemljivači, već se samo međusobno povezuju metalni delovi na glavi stuba, kako bi se sprečilo eventualno formiranje luka između ovih delova i požar na stubu. Ovakva je praksa dala, kako je pokazalo višegodišnje iskustvo, dobre rezultate.



UP_1, UP_2 — uljni prekidači
M. OTP. — metalni otpornik

Sl. 10.4

10.3. FRANCUSKA

Uputstva EDF u mrežama srednjeg napona, kako vazdušnim, tako i kablovskim ili mešovitim, predstavljaju tri vrste uzemljenja [31]:

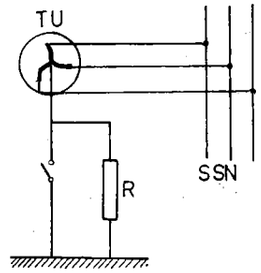
— direktno,
— preko male otpornosti,
— preko trofazne male reaktanse (transformatora za uzemljenje).

Direktno uzemljenje se primenjuje u slučajevima kada napojni transformator ima izvedenu neutralnu tačku i dovoljno veliku sopstvenu nultu reaktansu da ograniči struju zemljospoja na željenu vrednost. Primena direktnog uzemljenja u realnim uslovima dolazi u obzir samo kod transformatora — srednji napon/srednji napon, malih snaga.

Uzemljenje neutralne tačke preko male otpornosti izvodi se u slučajevima kada napojni transformator ima neutralnu tačku ali mu je impedansa nedovoljna za ograničenje struje zemljospoja. Uzemljenje preko »trofaznog induktivnog kalema«, ustvari jednonamotajnog transformatora spregnutog u izlomljenu zvezdu, primenjuje se kada napojni transformator nema izvedenu neutralnu tačku na strani mreže koja se uzemljuje.

Uzemljenje preko male otpornosti predstavlja najčešće primenjivano rešenje. Ovakav se način uzemljenja smatra prihvatljivim i kada se radi o dvonamotajnom transformatoru — visoki napon/srednji napon, sa istovremenim direktnim uzemljenjem neutralne tačke na visokonaponskoj strani. Pri tom se zahteva provera uticaja zemljospojeva u srednjenaponskoj mreži na zaštitu mreže visokog napona, kako ne bi došlo do njenog nepoželjnog aktiviranja. Daje se prednost metalnim otpornicima, prvenstveno zbog jednostavnosti održavanja.

Kod uzemljenja preko reaktansi konstatovani su u pojedinim slučajevima visoki prenaponi pri isključenju zemljospojeva, posebno dvostrukih (pogledati 5.3 i 4.4). Zbog toga se kod ovakvog uzemljenja struje jednofaznog zemljospoja ograničavaju na nešto niže vrednosti, a pri projektovanju postrojenja i transformatora za uzemljenje predviđa se eventualna naknadna ugradnja, ako se za to ukaže potreba, otpornika koji se postavlja u neutralnu tačku transformatora (sl. 10.5).



Sl. 10.5

Izbor struje jednofaznog zemljospoja izvršen je na osnovu analize više faktora:

— induktivnog uticaja na PTT vodove,

— elektrodinamičkog naprezanja opreme,

— napona na uzemljivačima srednjenaponske mreže, kao i u niskonaponskoj mreži u slučaju proboja izolacije između namotaja tramsformatora srednji napon/niski napon,

— mogućnosti upotrebe pokazivača zemljospoja,

— prenapona pri isključenju zemljospoja, kod induktivno uzemljenih mreža,

— mogućnosti primene uzemljenja u mešovitim mrežama.

Prva tri od navedenih faktora deluju u smeru snižavanja, a druga tri u smeru povišenja struje zemljospoja.

Studija svih navedenih faktora pokazala je da su za francuske uslove optimalne sledeće struje zemljospoja:

— 1000 A za kablovske mreže velikih gradova,

— 300 A za sve druge mreže.

Kod induktivno uzemljenih mreža potrebno je predvideti mesto za dodatnu ugradnju otpornika.

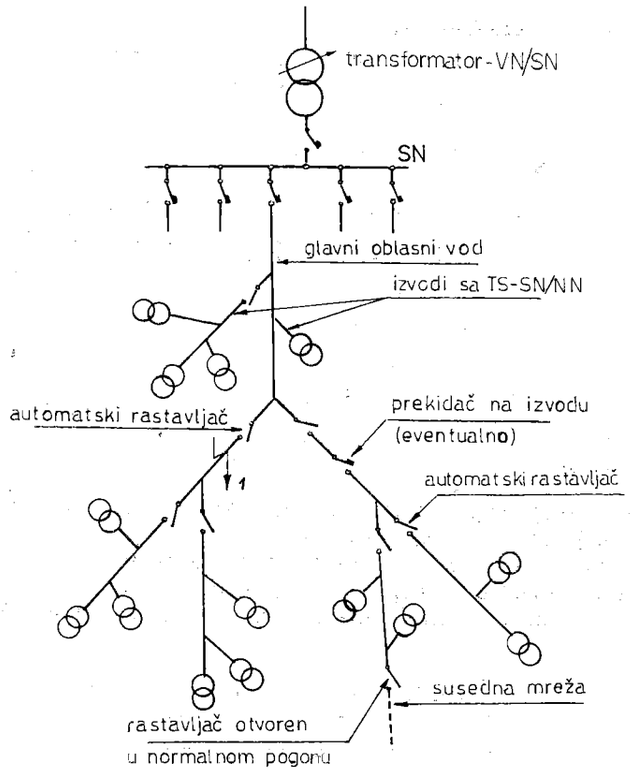
U Francuskoj se mreže srednjeg napona, kako vazdušne, tako i kablovske, izvode po pravilu kao radijalne [100, 103].

Na sl. 10.6 prikazana je tipična vazdušna mreža sa naznakom odgovarajuće zaštitne komutacione aparature.

Kako je pomenuto u 7.6.2, za zaštitu od zemljospojeva u vazdušnim mrežama predviđa se APU sa brzim i sporim ponovnim uključenjem, kao i eventualna primena zemljospojnog prekidača. Takođe se koristi i posebna zaštita od kvarova sa velikom prelaznom otpornošću. Pomenute zaštite aktiviraju prekidače glavnog voda ili prekidače u izvodima, ako ovi postoje (sl. 10.6).

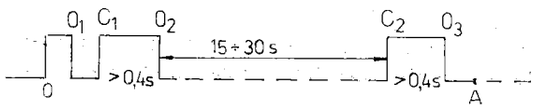
Pojedini izvodi se često štite i primenom »automatskog rastavljača« koji se aktivira preko posebnog »brojača prolaza struje«. Pomenuti uređaj se pobuđuje

prekostrujnim releom pri svakom prolazu struje kvara u ciklusu isključivanja zemljospoja prekidačem (na primer, za kvar na mestu 1 na sl. 10.6 ciklus APU izvodi prekidač glavnog voda a pobuđuje se brojač rastavljača ispred mesta kvara).



Sl. 10.6

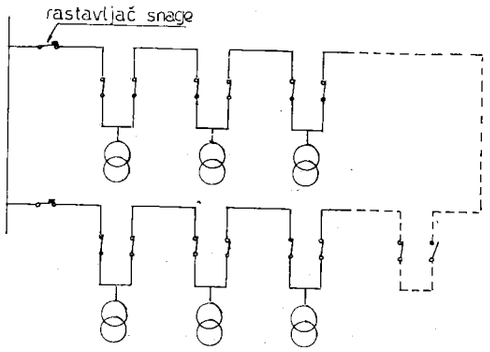
Posle određenog broja prolaza struje, koji zavisi od podešenja APU, rastavljač na izvodu se automatski otvara u beznaponskoj pauzi i tako isključuje neispravan izvod iz mreže. Na sl. 10.7 prikazan je ciklus opisane operacije isključenja neispravnog izvoda, za slučaj kada je podešeno da se rastavljač otvori posle trećeg prolaza struje (tačka *A*).



Sl. 10.7

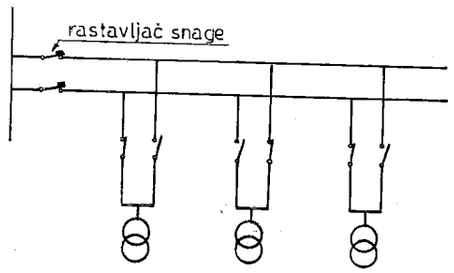
Kablovske mreže se po pravilu grade kao prstenaste, tako da se napojni vod vraća na iste sabirnice sa kojih polazi. Prsten radi otvoren (sl. 10.8).

U područjima sa specifičnom potrošnjom većom od 2 MW/km² u francuskim uslovima postaje ekonomski opravdana primena šeme sa dvostrukim napojnim vodom, prikazana na sl. 10.9.



Sl. 10.8

Selektivno isključenje jednofaznih zemljospojeva u prstenastim mrežama ostvaruje se na različite načine, zavisno od tehničko-ekonomskih uslova u pojedinim slučajevima. Često se koriste pokazivači kvara sa daljinskom signalizacijom koja se ostvaruje preko posebnog pilot-voda ili ton-frekventnim putem, posredstvom energetskog kabla. Deonica u kvaru otkriva se poređenjem stanja pokazivača.



Sl. 10.9

Neispravna deonica se u nekim rešenjima nalazi i isključuje usaglašenim delovanjem prekidača i rastavljača na vodu, uz primenu odgovarajuće automatike i vremenskog podešenja [103].

Zaštita mreža sa dvostrukim napojnim vodom znatno je jednostavnija. Transformatori SN/NN u normalnom pogonu imaju zatvoren samo jedan rastavljač. U slučaju gubitka napona oni se automatskom manipulacijom rastavljača odvajaju od neispravnog, isključenog voda i prebacuju na drugi vod.

10.4. S A D

U preporukama Američkog instituta elektrotehničkih inženjera (AIEE) kod prenosnih i distributivnih mreža predviđaju se, kao mogući, svi poznati načini uzemljenja neutralne tačke [29]:

— direktno,
— preko male reaktanse,
— preko male otpornosti,
— preko kompenzacione prigušnice.

Osnovni činioci koji treba, prema navedenim preporukama, da budu analizirani pre opredeljenja za određeno rešenje su:

— osetljivost i selektivnost zaštite od zemljospojeva,
— ograničenje struja jednofaznih zemljospojeva,
— stepen zaštite od atmosferskih prenapona koji se ostvaruje ventilnim odvodnicima prenapona,
— ograničenje prelaznih prenapona.

Smatra se da se selektivna zaštita može bez teškoća ostvariti kod svih načina uzemljenja pri kojima struje jednofaznog zemljospoja nisu manje od 10% struje trofaznog kratkog spoja. Da bi se obezbedilo selektivno isključenje trajnih zemljospojeva i kod kompenzovanih mreža, gde prethodno navedeni uslov po pravilu neće biti ispunjen, preporučuje se primena kratkotrajnog premošćenja prigušnice.

Struje jednofaznog zemljospoja bi, prema preporuci, bilo poželjno u svim uslovima ograničiti na vrednosti manje od struja trofaznih kratkih spojeva. Kod sistema sa dužim vremenima isključenja kvara preporučuje se smanjivanje struja i do reda 10% struje trofaznog kratkog spoja.

Kako je ranije navedeno, način uzemljenja mreža se bira i sa stanovišta prenapona na ispravnim fazama pri zemljospoju, koji uslovljavaju nazivni napon prenaponskih odvodnika. Ovi sa svoje strane određuju potrebni izolacioni nivo aparature postrojenja. Kod mreža sa strujom zemljospoja iznad 60% struje trofaznog kratkog spoja (ovakav se odnos postiže obično kada je $X_0/X_\alpha \leq 3$, gde su X_0 i X_α reaktanse mreža na mestu kvara za o i α redosled) moraće se po pravilu primeniti odvodinici prenapona za izolovanu neutralnu tačku, tako da se oprema neće moći izvoditi sa svedenom izolacijom.

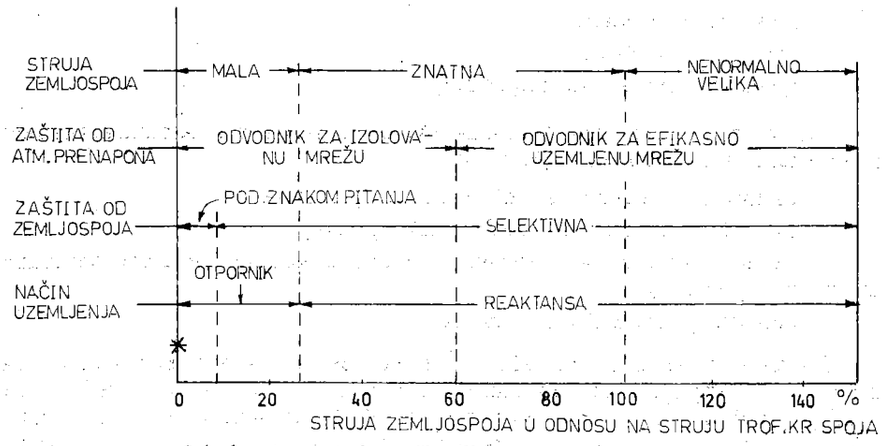
U američkoj praksi nisu registrovani intermitentni prenaponi sa visokim faktorima prenapona prema teoriji Petersona. Realnim izvorom prenapona smatraju se operacije prekidanja struja zemljospoja praćene ponovnim paljenjem ili probojem u prekidaču. Smatra se da na pomenutu vrstu prenapona osetno utiče način uzemljenja neutralne tačke. Najveći prenaponi javljaju se kod mreža sa izolovanom neutralnom tačkom, a najniži kod mreža koje su uzemljene preko male otpornosti ili reaktanse, ako je kod ovih poslednjih ispunjen uslov

$$\frac{X_0}{X_\alpha} \leqslant 10,$$

sa istim značenjem simbola kao ranije. U pogledu veličine razmatranih prenapona kompenzovane su mreže manje ugrožene od mreža sa izolovanom neutralnom tač-

kom, a više od mreža uzemljenih preko male impedanse. Konstatovano je, međutim, da prenaponi opisane vrste mogu imati relativno visoke vrednosti i kod mreža uzemljenih preko male impedanse ako su prekidači skloni ponovnim probojima.

Poređenje načina uzemljenja prema analiziranim osnovnim činiocima dato je grafički na sl. 10.10.



* izolovana neutralna tačka ili kompenzovana mreža

Sl. 10.10

Niže vrednosti reaktansi od onih koje odgovaraju odnosu $I_z/I_{(3)}=0{,}25$ nisu poželjne sa stanovišta prenapona pri manipulacijama u mreži, ali se, prema eksperimentalnim iskustvima, mogu dozvoliti ako preostali deo mreže, nakon isključenja voda u kvaru, ima pogonsku kapacitivnu struju barem reda 0,5% struje trofaznog kratkog spoja. Ovim se uslovom osigurava povoljan efekat kapaciteta mreže na tok komutacionog prenapona.

Induktivno uzemljenje ostvaruje se direktnim uzemljenjem mrežnog transformatora, ako ovaj ima potrebno veliku nultu reaktansu, ili, ako to nije slučaj, ugradnjom prigušnice između neutralne tačke i zemlje. Ako mrežni transformator nema izvedenu neutralnu tačku koriste se posebni transformatori za uzemljenje koji se obično uvode kao jednonamotajni, spregnuti u izlomljenu zvezdu.

Uzemljenje preko male reaktanse nalazi sve veću primenu u američkoj praksi, naročito u mrežama napona viših od 115 kV, gde se reaktansa bira tako da ipak ne narušava efikasno uzemljenje mreže kako bi se moglo uštedeti u izolaciji opreme.

Donja granica struja zemljospoja kod primene uzemljenja preko otpornika, prema sl. 10.10, određena je uslovima rada relejne zaštite. Gornja granica je dobijena na osnovu ekonomskih razmatranja. Smatra se, naime, da je kod struja jednofaznih zemljospojeva većih od 25% struja trofaznih kratkih spojeva, uzemljenje preko reaktanse jeftinije nego preko otpornosti zbog velikih razmera otpornika.

Kompenzacione prigušnice primenjivane su kao specifična rešenja u svim mrežama od 2,4 kV do 230 kV. Zbog uštede u izolaciji koja se može postići uzemljenjem preko male reaktanse, očekuje se da će se primena kompenzacije ograničiti samo na mreže nižih napona, na primer 66 kV i 33 kV.

10.5. SR NEMAČKA

Preporuke VDE predviđaju sledeće načine uzemljenja mreža [36]:

— izolovana neutralna tačka,
— primena kompenzacionih prigušnica,
— privremeno (prolazno) »niskoomsko uzemljenje«.

Ovde se pod »niskoomskim uzemljenjem« podrazumeva i direktno uzemljenje neutralne tačke, bez uključivanja posebno dimenzionisane male impedanse. Pojam prolaznog niskoomskog uzemljenja primenjuje se na mreže kod kojih se neutralna tačka samo kratkotrajno niskoomski uzemljuje u cilju isključivanja trajnih jednofaznih zemljospojeva. Isti se pojam odnosi i na mreže kod kojih se umesto neutralne tačke kratkotrajno uzemljuje jedan od faznih provodnika.

Kako je ranije u 3.2.4 navedeno, VDE propisi za zaštitu postrojenja od prenapona iz 1957. god. [19] preporučuju da se mreže uzemljuju čim im struja zemljospoja dostigne vrednost od 3 A, smatrajući da pri strujama većim od navedene vrednosti samogašenje luka na mestu kvara nije sigurno. Propisi o merama zaštite od uticaja energetskih na telekomunikaciona postrojenja [20, 21], izašli 1965. odnosno 1971. god., za granične struje samogašenja daju znatno veće vrednosti, pokazane na sl. 3.12.

Za zaštitu od prenapona pri isključenju zemljospojeva i drugim komutacijama u izolovanoj i kompenzovanoj mreži se preporučuje određen, precizno utvrđen redosled manipulacija, zavisno od uklopnog stanja mreže.

Novi propisi iz oblasti uzemljenja [36] donose nekoliko značajnih izmena ranije važećih normi. Prema novim propisima, kako je napomenuto u 6.2, uzemljivači postrojenja projektovali bi se samo prema dozvoljenim naponima dodira, a ne i koraka. Kriva dozvoljenih napona dodira pri tom je znatno liberalizovana u zoni malih vremena trajanja kvara. Napon dodira se meri uz pretpostavku da je otpor čovekovog tela 1000 Ω, a ne 3000 Ω, kao prema ranijim propisima, čime se uslovi bezopasnosti još dodatno ublažuju.

Zaštita od opasnih napona u postrojenjima i van njih postiže se kombinovanjem više mera: brzim isključenjem kvara, niskim otporom uzemljivača, kao i oblikovanjem potencijala postavljanjem posebnih uzemljivačkih mreža na mogućim putevima pristupa, njihovim zasipanjem ili asfaltiranjem.

Ne zahtevaju se nikakve mere zaštite od opasnih napona unutar ili van postrojenja, nezavisno od načina uzemljenja nutralne tačke mreže, ako je napon na uzemljivaču manji od 125 V.

Pri analizi uslova povezivanja svih zaštitnih i radnih uzemljenja u TS-srednji/niski napon ne uzima se u obzir dvostruki zemljospoj, pošto se ovaj smatra malo verovatnim. Spajanje uzemljenja dozvoljava se bez obzira na karakteristike mreža visokog i niskog napona, ako je napon uzemljivača manji od 125 V ili ako se pomenuta TS nalazi na visoko urbanizovanom ili industrijalizovanom terenu. U slučaju da navedeni uslovi nisu ispunjeni, preporučuju se različita rešenja, zavisno od načina uzemljenja mreže srednjeg napona. Ako je srednjenaponska mreža uzemljena preko male impedanse, a niskonaponska mreža nulovana, niskonaponsko radno uzemljenje treba odvojiti od uzemljenja srednjeg napona. Kod ostalih mreža srednjeg napona dozvoljava se objedinjavanje uzemljivača bez obzira na vrstu zaštite od opasnih napona koja se koristi u mreži niskog napona, ako se kod uzemljivača u slučaju jednofaznog zemljospoja neće trajnije (duže od nekoliko sekundi) pojaviti napon dodira viši od 65 V.

Kod izolovanih i kompenzovanih mreža, kao i mreža sa prolaznim niskoomskim uzemljenjem, ne dozvoljava se kod stubova pojava većih napona dodira od 65 V. Smatra se da će ovaj uslov biti sigurno ispunjen ako je impedansa uzemljenja stuba, izmerena bez odvajanja eventualnog zaštitnog užeta, dovoljno mala da obezbedi da se na stubu u slučaju jednofaznog zemljospoja ne pojavi napon viši od 125 V. Posebno uzemljenje stubova ne mora se izvoditi kada ni prethodni uslov nije ispunjen, ako su na vodovima primenjeni štapni izolatori ili izolatori sa punim jezgrom, ili izolatori kod kojih se stanje izolacije može utvrditi vizuelnim pregledom spolja, ili, najzad, ako se u mreži ne dozvoljava trajniji rad u zemljospoju, već se ovi odmah traže ili isključuju.

Za mreže uzemljene preko male impedanse predviđa se kod vodova kod kojih preovladavaju čelični ili armirano-betonski stubovi obavezno postavljanje zaštitnog užeta, koje treba da bude povezano sa uzemljenjem napojnog postrojenja. U pomenutim uslovima nije potrebno predviđati bilo kakve dodatne mere zaštite od opasnih napona kod stubova, ako se zemljospojevi u mreži isključuju u vremenima do 0,5 s. Izuzetno je kod stubova pored javnih kupališta i na kamping-prostorima neophodna provera napona dodira koji, računati za dužinu premošćenja od 1,5 m, ne smeju da imaju veće vrednosti od graničnih prema dijagramu na sl. 6.7. Da bi se postigli propisani uslovi bezopasnosti može se primeniti oblikovanje potencijala, izolaciona prekrivanja, kao i ograđivanje stubova. Kod drvenih stubova i stubova sa traverzama od izolacionih materijala nije potrebno ni u razmatranim okolnostima primenjivati posebne mere zaštite.

Na sl. 10.11 prikazana je, primera radi, principijelna šema transformacije 110/10 kV za područje Bohuma, gde je primenjena kompenzacija sa prolaznim niskoomskim premošćenjem. Mreža 10 kV kompenzuje se preko dve prigušnice 200 A od kojih je jedna regulaciona i vezana za neutralnu tačku napojnog transformatora, a druga se nalazi u jednom razvodnom postrojenju u mreži 10 kV i priključena je preko transformatora za uzemljenje. Kompenzaciona prigušnica u napojnoj TS premošćuje se malom reaktansom ako se u neutralnoj tački pojavi napon i traje bar 3 s. Reaktansa ima 4 Ω i predviđena je za struju od 1500 A.

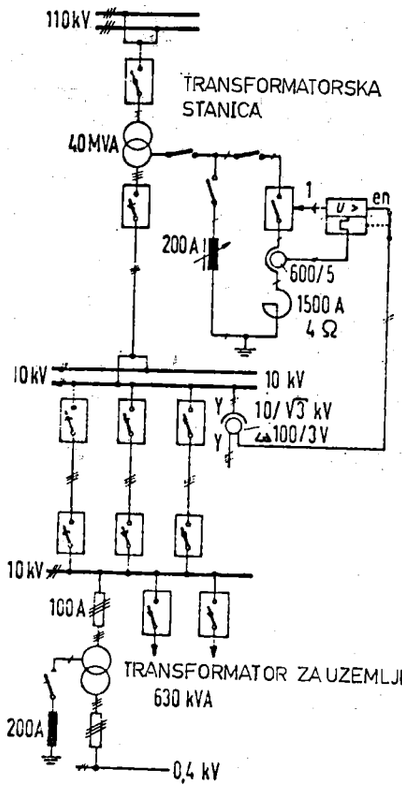
Rešenje je primenjeno i u čisto kablovskim mrežama 10 kV, gde je takođe konstatovan značajan procenat prolaznih zemljospojeva i sa njim se imaju pozitivna pogonska iskustva [18].

Na području Gevelsberga je u pet mreža 10 kV primenjeno uzemljenje preko male otpornosti [11]. Ovim se rešenjem želeo obezbediti zadovoljavajući rad ovih mreža posle prelaska sa 5 kV na 10 kV, bez zamene kablova. Tri od navedenih mreža napajaju se iz transformacija 110/10 kV sa transformatorima sprege zvezda—zvezda sa dodatnim kompenzacionim tercijerom vezanim u trougao. Kod pomenutih mreža otpornik za uzemljenje vezan je preko rastavljača snage za neutralnu tačku napojnog transformatora. Preostale dve mreže napajaju se transformatorima 30/10 kV sa trouglom na strani 10 kV. Za priključenje otpornika ovde su zato morali da budu primenjeni transformatori za uzemljenje.

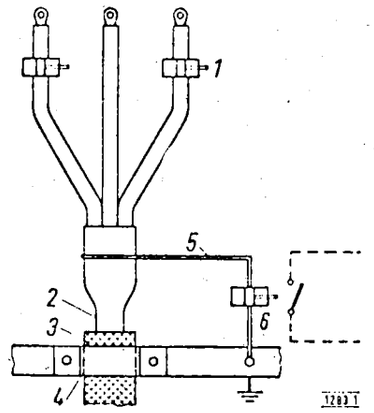
Kablovske deonice u kvaru nalaze se pomoću »pokazivača kratkog spoja« koji se uključuje na zemljovod omotača kabla prema sl. 10.12.

Na slici su sa 1 označeni pokazivači međufaznih spojeva, 2 je metalni plašt kabla, 3 je koroziona zaštita kabla, 4 izolaciona folija, 5 zemljovod i 6 pokazivač zemljospojeva, eventualno sa kontaktom za daljinsku signalizaciju. Pokazivač 6 registruje deo struje zemljospoja koji se preko plašta kabla vraća do uzemljenja postrojenja. U mrežama AVU Gevelsberga primenjena je daljinska signalizacija položaja pokazivača, što je znatno skratilo vreme potrebno za otkrivanje kvara.

Najčešće primenjivani način uzemljenja srednjenaponskih mreža u SR Nemačkoj je preko kompenzacione prigušnice. Takvo se rešenje već niz godina sa uspehom koristi u mrežama velikih gradova.



Sl. 10.11



Sl. 10.12

U Minhenu, na primer, primenjuju se kompenzacione prigušnice bez automatske regulacije [39]. Prigušnice se izvode tipizirano, za radne struje od 100 ili 50 A. Oko 40% mreže 10 kV su prema stanju 1970. god. činili stari kablovi napuštene mreže 5 kV. Osnovni tip kabla je troolovni NAEKBA 3×185 Al koji omogućuje nešto veća opterećenja pri istom preseku od klasičnih pojasnih kablova, ali ima velike kapacitivne struje (reda 3,5 A/km), tako da i manja mrežna područja zahtevaju kompenzaciju. Mreža je oblikovana u vidu prstena koji polaze i završavaju se na istim sabirnicama napojnog transformatora. Ona je radijalna, pošto prstenovi normalno rade otvoreni.

Mrežna područja imaju struje zemljospoja do reda 300 A i obično su potkompenzovane za 20÷40 A. Jednofazni zemljospojevi se otkrivaju posredstvom selektivne signalizacije i otklanjaju u proseku u toku 40 min, a najduže za 2 časa.

Jedinična snaga transformatora 110/10 kV je 31,5 MVA, a transformatorske stanice se rade sa 3 transformatora od kojih je jedan predviđen za rezervu.

10.6. SSSR

Mreže 6,10 i 35 kV u SSSR rade izolovane ili, kada su struje zemljospoja veće od dozvoljenih, sa kompenzacionim prigušnicama. Propisi predviđaju rezonantno podešavanje prigušnica, odnosno tačnu kompenzaciju. U mrežama 6 i 10 kV dozvoljava se prekompenzacija od 5% kada reaktivna komponenta struje zemljospoja na mestu kvara nije veća od 10 A. U mrežama 35 kV dozvoljava se prekompenzacija 10% ako pomenuta struja na mestu kvara nije veća od 15 A.

Granične dozvoljene struje jednofaznog zemljospoja za izolovane mreže određuju se iz uslova da se zemljospoj ne razvije u višefazni kratak spoj na mestu kvara, prema podacima navedenim u Tabeli 3.6. Kada su na mrežu priključene električne mašine (generatori, asinhroni motori) struja zemljospoja se ograničava na 5 A, da bi se izbegla oštećenja mašina [74].

U kompenzovanim mrežama se u neutralnu tačku u normalnom pogonu ne dozvoljava trajno povišenje napona veće od 0,15 U_{nf}, a u toku 1 časa, veće od 0,3 U_{nf}. Propisi predviđaju povremeno merenje struje zemljospoja u mogućim uklopnim stanjima mreže. Merenja se vrše prema potrebi i ne ređe od jednom u pet godina.

Distributivne mreže velikih gradova često se napajaju iz lokalnih elektrana neposredno na generatorskom naponu, vrlo su prostrane i imaju znatne kapacitivne struje zemljospoja.

U Moskvi oko 70% mrežnih područja napona 6,10 i 35 kV radi kompenzovano (stanje 1974 god.), a ostatak sa izolovanom neutralnom tačkom zbog malih ukupnih dužina vodova.

Struktura mrežnih područja prema veličini struja zemljospoja prikazana je u Tabeli 10.1.

TABELA 10.1

Struja zemljospoja I_z, A	%
$I_z \leqslant 100$	8
$100 < I_z \leqslant 200$	35
$200 < I_z \leqslant 400$	45
$400 < I_z \leqslant 500$	4
$500 < I_z$	8

Pojedine mreže imaju struje zemljospoja čak reda 1000 A i više.

Kod mreža 6 i 10 kV često se toleriše rad sa izolovanom neutralnom tačkom i kod struja reda 50 A, što ne stvara nikakve pogonske smetnje.

Smatra se da pravilno eksploatisana kompenzovana mreža ima sledeća preimućstva u odnosu na izolovane mreže:

— smanjuje se struja kroz mesto kvara čime se stvaraju uslovi za samogašenje uspostavljenog električnog luka;

— ograničavaju se prenaponi;

— smanjuje se opasnost od električnog udara u okolini mesta kvara;

— olakšava se i pojeftinjuje izgradnja uzemljivača, koji se projektuju prema preostaloj, nekompenzovanoj struji zemljospoja (u mreži Mosenergo za pomenutu struju se usvaja 100 A);

— moguć je dugotrajan rad sa jednofaznim zemljospojem (u mrežama napajanim direktno generatorima elektrana ne dozvoljava se rad u zemljospoju duži od 2 časa);

— sprečava se nekontrolisano povišenje napona u neutralnoj tački.

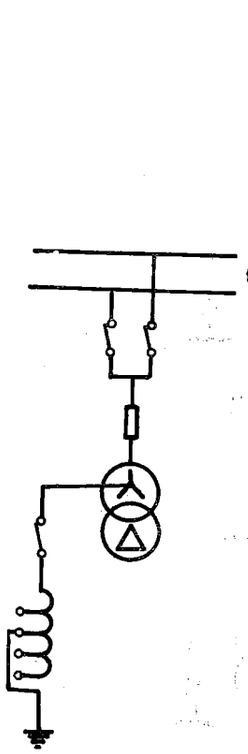
U moskovskim mrežama se primenjuju tri tipa kompenzacionih prigušnica:

— prigušnice sa izvodima (6 do 9 izvoda) koje se regulišu ručno;

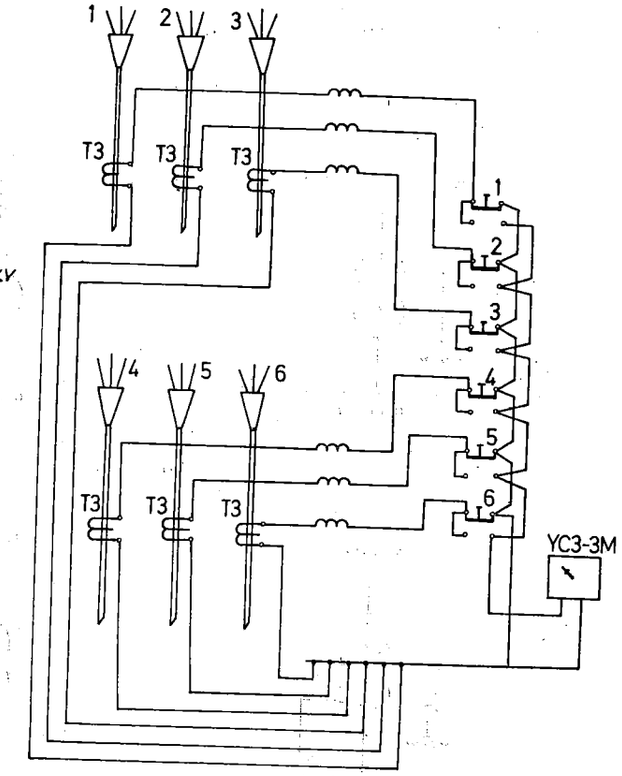
— prigušnice sa kontinualnom regulacijom, ostvarenom promenom vazdušnih zazora u magnetnom kolu;

— prigušnice kod kojih se kontinualna regulacija ostvaruje dodatnim magnećenjem jednosmernom strujom.

Prigušnice se priključuju po pravilu na transformatore sopstvene potrošnje (sl. 10.13).



Sl. 10.13

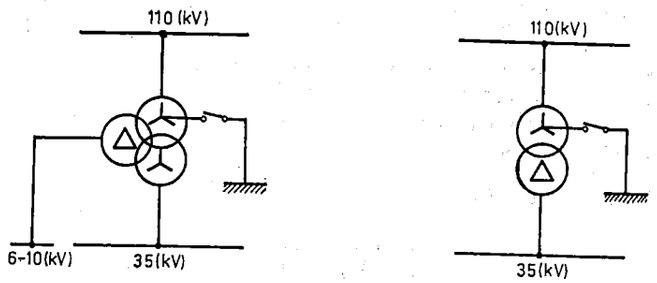


Sl. 10.14

U moskovskoj kablovskoj mreži nisu registrovani nikakvi opasni ili smetajući uticaji energetskih vodova na telegrafsko-telefonske linije niti radio i TV smetnje pri zemljospojevima.

Kabl u zemljospoju otkriva se na osnovu merenja sadržaja viših harmonika u nultim komponentama struja u granama mreže. Uređaj za merenje sadržaja viših harmonika, USZ-ZM, priključuje se na sekundar obuhvatnog strujnog transformatora, a sačinjen je od kombinacije filtara različitih učestanosti.

Na sl. 10.14 pokazan je način vezivanja uređaja USZ-ZM u razvodnom postrojenju. Kabl u kvaru otkriva se pritiskivanjem kontaktnih dugmadi 1 do 6 čime se uređaj redom priključuje na obuhvatne transformatore svih kablova, koji polaze iz postrojenja.

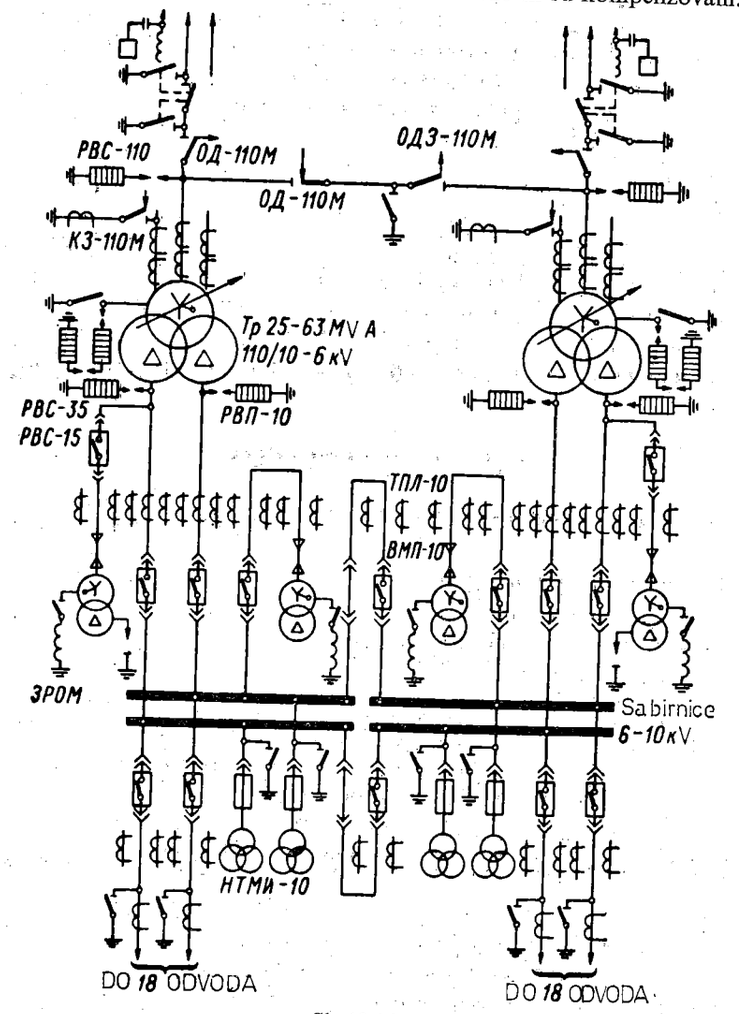


Sl. 10.15

Način uzemljenja neutralne tačke mreža Lenjingrada prikazan je šematski na sl. 10.15.

Mreža 110 kV uzemljena je direktno, ali ne kod svih transformatora. Struje jednofaznih zemljospojeva u mreži 110 kV reda su 20 do 22 kA.

Deo kablovske mreže 35 kV radi sa direktnim uzemljenjem neutralne tačke, kako bi se mogli održati u eksploataciji i kablovi 35 kV starije proizvodnje, koji ne bi mogli da podnesu prenapone do kojih dolazi kod izolovanih ili kompenzovanih mreža. Struja jednofaznih zemljospojeva u pomenutim mrežnim područjima kreće se od 6 do 12 kA. Noviji delovi mreže rade izolovano ili su kompenzovani.



Sl. 10.16

Mreže 6÷10 kV su kompenzovane. Struje jednofaznih zemljospojeva u mrežnim područjima imaju vrednosti od 20 do 460 A. Kompenzacija struja zemljospoja

u mrežama 6 kV primenjuje se kada ova struja pređe vrednost od 30 A. Najveće struje zemljospoja u mrežama 6 kV iznose 400 A. U mrežama 10 kV sa kompenzacijom se počinje pri strujama jednofaznog zemljospoja većim od 20 A. Pojedina područja imaju struje jednofaznog zemljospoja i do 500 A. Kompenzacija struja zemljospoja u mrežama 35 kV počinje od struja 10 A. Najveće dostignute struje su reda 700 A.

Prema stanju u 1973. god., 65% mrežnih područja bilo je kompenzovano, 15% je bilo ispod usvojenih kritičnih struja, a kompenzacija preostalog dela bila je u pripremi. Pri tom je 48% mreža radilo sa tačnim podešenjem prigušnica, 46% bilo je natkompenzovano, a 6% potkompenzovano.

Povređeni kablovi pri trajnim zemljospojevima otkrivaju se takođe primenom uređaja USZ-ZM. 90% ovakvih kvarova otkloni se za vreme kraće od 2 časa.

Koriste se kompenzacione prigušnice različitih tipova, sa skokovitom i kontinualnom regulacijom. U narednom periodu će u većoj meri biti korišćena i automatska regulacija prigušnica.

Na sl. 10.16 prikazana je tipična principijelna šema TS $110/6 \div 10$ kV koja se koristi za napajanje gradskih mreža [109].

TS ima dva transformatora snage 25 do 63 MVA a napaja se preko vazdušnih ili kablovskih vodova 110 kV. Transformatori su u blok-spoju sa napojnim vodovima i umesto prekidača, na strani 110 kV imaju rastavljače snage i kratkospajače.

Sabirnice 6 (10) kV razdvojene su u četiri sekcije sa kojih polazi 24,32 ili 36 vodova zavisno od snage transformatora. Mreža 6 (10) kV je kompenzovana. Na svaku sekciju vezana je preko transformatora za uzemljenje posebna prigušnica.

10.7. SFR JUGOSLAVIJA

Jugoslovenski propisi predviđaju sve osnovne načine uzemljenja neutralne tačke [41]:

— izolovanu neutralnu tačku
— primenu kompenzacije
— uzemljenje preko male impedanse
— efikasno uzemljenje.

Termin »efikasno« primenjuje se u smislu definisanom u 1.1.3. U praktičnim uslovima efikasno uzemljenje postiže se direktnim uzemljenjem neutralnih tačaka, po pravilu u svakom postrojenju mreže. Pomenuti način uzemljenja primenjuje se u svim mrežama najviših napona počev od 110 kV.

U okviru normativa za zaštitu od prenapona [25] kao granično dozvoljene struje zemljospoja za izolovane mreže propisuju se vrednosti iz Tabele 3.6, kako je pomenuto u 3.7.1.

Nazivni naponi javnih distributivnih mreža su 10, 20 i 35 kV a kod industrijskih postrojenja i elektrana primenjuje se i napon 6 kV.

Sve pomenute mreže srednjeg napona grade se po pravilu kao radijalne. U gradskim mrežama pri tom se obično obezbeđuje rezervno napajanje preko susednih mreža.

Najveći broj mreža 10 i 20 kV radi sa izolovanom neutralnom tačkom. Mreže su obično manje prostranosti, sa strujama zemljospoja koje ne prevazilaze 50 A.

Mreže 35 kV su takođe delom sa izolovanom neutralnom tačkom, a u mnogima je izvedeno uzemljenje preko male reaktanse ili otpornika, pri čemu je struja zemljospoja ograničena po pravilu na 300 A ili 1000 A. Izvestan broj mreža 35 kV radi i sa kompenzacijom struje zemljospoja.

U izolovanim mrežama obično se koristi samo neselektivna signalizacija zemljospoja a u pojedinim slučajevima usmerena zemljospojna zaštita, zasnovana na tokovima reaktivnih snaga, domaće proizvodnje.

Postoji tendencija sve veće primene uzemljenja preko male otpornosti u kablovskim distributivnim mrežama svih naponskih nivoa.

U pogledu načina uzemljenja vazdušnih mreža i mešovitih mreža sa većim udelom vazdušnih vodova imaju se u vidu različita rešenja, zavisno od specifičnosti pojedinih mreža. S obzirom na teškoće koje su se imale u pogonu pojedinih kompenzovanih mreža, zbog složenosti eksploatacije i manipulacione tehnike [110], pomenuti način uzemljenja verovatno neće biti u perspektivi u većoj meri primenjivan.

Racionalnim rešenjem za vazdušne mreže, prema trenutnim procenama, smatra se uzemljenje preko male impedanse uz primenu automatskog ponovnog uključenja ili pogon sa izolovanom neutralnom tačkom. Kod izolovanih mreža došle bi u obzir, zavisno od tehničko-ekonomskih uslova, različite vrste zaštite i automatike, počev od najskupljih rešenja sa selektivnom zaštitom uz APU, do obične neselektivne signalizacije bez prenosa na daljinu.

Jugoslovenski propisi u oblasti zaštite od prenapona i uzemljenja postrojenja za sada u nedovoljnoj meri obrađuju pitanja uzemljenja neutralnih tačaka mreža srednjeg napona, posebno uzemljenja preko male impedanse. Praktična iskustva koja se već imaju sa mrežama uzemljenim preko male impedanse, kao i pojedina eksperimentalna ispitivanja na mrežama]70, 73], pružaju dosta materijala za izradu određenih normativa.

Analize zaštitnih mera od opasnih napona u mrežama i instalacijama niskog napona kao i načina uzemljenja mreža 10 kV, rađene za Beograd, ukazale su na pogodnosti postepenog prelaza na uzemljenje preko male otpornosti [73, 97]. Kablovske mreže 10 kV Beograda imale su 1976. ukupnu dužinu preko 960 km od čega pretežni deo čine kablovski vodovi tipa IPO 13. Mreže 10 kV su radijalne, jednostrano napajane i rade sa izolovanom neutralnom tačkom. Mreže 10 kV se napajaju iz dve TS 110/10 kV i 53 TS 35/10 kV. Struje jednofaznih zemljospojeva ne prelaze vrednost reda 50 A. U mreži 0,4 kV primenjeno je zaštitno uzemljenje.

U pojedinim TS 35/10 kV su na strani 10 kV već ugrađeni vodeni otpornici za uzemljenje koji su van pogona. U većini mreža primenjuje se neselektivnna signalizacija zemljospojeva, a u pojedinim usmerena zemljospojna zaštita.

Izvedene analize su pokazale da kao generalno, tipsko rešenje za kablovske mreže 10 kV treba usvojiti uzemljenje neutralne tačke preko male otpornosti sa strujom jednofaznog zemljospoja od 300 A. Smatra se da se pomenuti način uzemljenja može primenjivati nezavisno od uslova u mrežama niskog napona i pri svim dužinama vodova mreže 10 kV do 150 km. Pri većim dužinama od navedene umanjili bi se pozitivni uticaji uzemljenja na tranzijentne prenapone pri zemljospojevima.

Predloženi način uzemljenja treba primenjivati odmah kod novih kablovskih mreža. Redosled provođenja postojećih mreža 10 kV na novu tehniku uzemljenja treba ustanoviti prema tehničkim karakteristikama ovih mreža. Pri tom prioritet treba da imaju mreže sa većom dužinom vodova, kao i mreže kod kojih već postoje zemljospojna zaštita i otpornici za uzemljenje.

Utvrđeno je da se uzemljenjem preko male otpornosti postižu sledeći pozitivni efekti:

— isključuje se mogućnost pojave dvostrukih zemljospojeva i drugih višestrukih kvarova, prouzrokovanih jednofaznim zemljospojem, što omogućava izvođenje objedinjenih uzemljivača kod TS-10/0,4 kV,

— prigušuju se prolazni prenaponi pri nastanku i isključivanju jednofaznih zemljospojeva i drugih kvarova prema zemlji, čime se smanjuju naprezanja izolacije i smanjuje ukupan broj kvarova u mreži,

— omogućava se primena jednostavne prekostrujne zaštite.

Izabrana vrednost struje dozemnog spoja:

— omogućava lako postizanje uslova bezopasnosti kod uzemljenja TS 10/0,4 i instalacija potrošača,

— obezbeđuje pouzdano delovanje zemljospojne zaštite,

— stvara zanemarljive uticaje na telekomunikacione vodove,

— predloženo rešenje u celini odlikuje jednostavnost izvođenja i održavanja uz male troškove gradnje i eksploatacije.

Kao tipsko, generalno rešenje za vazdušne mreže 10 kV predloženo je da se zadrži pogon sa izolovanom neutralnom tačkom i signalizacijom zemljospoja.

Ovakvim se rešenjem:

— obezbeđuje minimalni broj prekida pogona usled zemljospojeva,

— lako se postižu uslovi bezopasnosti kod TS 10/0,4 kV kod svih kvarova u mreži,

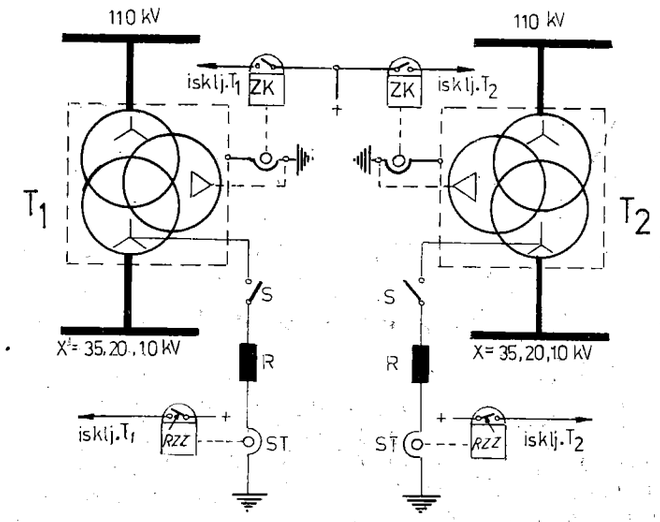
— imaju se minimalni investicioni troškovi.

Predloženo rešenje je jednostavno za gradnju i održavanje i sa njim se imaju dobra pogonska iskustva. Istovremeno, struje jednofaznih zemljospojeva su vrlo male tako da ne treba očekivati povećani broj trajnih zemljospojeva i dvostrukih i složenijih kvarova.

Smatra se da mešovite mreže sa strujama zemljospoja većim od 20 A treba uzemljiti u svemu kao čisto kablovske mreže. Kod mešovitih mreža sa strujama zemljospoja manjim od 20 A može se primeniti ili rešenje za kablovske, ili za vazdušne mreže. Pri opredeljivanju za način uzemljenja treba imati u vidu strukturu mreže (ukupnu dužinu vazdušnih odnosno kablovskih vodova), kao i potrebe i mogućnosti u pogledu uvođenja automatskog ponovnog uključivanja kod vazdušnih vodova.

Slična rešenja su predviđena i delom već realizovana i u drugim velikim gradovima kao što su Zagreb, Ljubljana i drugi, kao i u pojedinim širim distributivnim područjima.

Na sl. 10.17 prikazan je, primera radi, način priključenja otpornika za uzemljenje neutralne tačke srednjenaponske mreže u transformatorskim stanicama 110/SN, koji se preporučuje za primenu u mrežama Srbije [110]. Mreže srednjeg napona uzemljuju se, prema predloženom rešenju, preko otpornika za struju od 300 A. Otpornik može biti metalni ili elektrolitski. Predviđa se da svaki transformator u TS ima poseban otpornik. U slučaju paralelnog rada transformatora na sabirnicama srednjeg napona, koji se predviđa samo izuzetno, ostaje uključen samo jedan otpornik.



Sl. 10.17

11. IZBOR NAČINA UZEMLJENJA NEUTRALNE TAČKE

11.1. PREGLED KARAKTERISTIKA RAZLIČITIH NAČINA UZEMLJENJA I POREĐENJE

Da bi se dobila dobra orijentacija o mogućnostima primene pojedinih načina uzemljenja neutralne tačke u različitim uslovima, u ovom će se odeljku dati pregled osnovnih karakteristika načina uzemljenja koje su inače ranije razmatrane detaljnije u posebnim poglavljima. U osnovne, ubrojane su karakteristike koje mogu da budu odlučujuće pri opredeljivanju kod izbora. Ocene svojstava daju se za najčešće, tipične uslove gradnje i pogona.

Izolovana neutralna tačka

Tehničke granice pogona sa izolovanom neutralnom tačkom određene su uslovima za samogašenje zemljospojeva. Kod gradskih mreža iz kojih se neposredno napaja mreža niskog napona, granicu za rad sa izolovanom neutralnom tačkom mogu predstavljati dvostruki zemljospojevi, ako je verovatnoća njihovog nastanka iznad tolerisane.

Kod razmatranog načina uzemljenja može doći do intermitentnih prenapona kada su struje zemljospoja male, ispod reda 10 A. Pomenuta pojava je manje verovatna kod vazdušnih mreža.

Maksimalni faktor prenapona pri nastanku jednofaznih zemljospojeva obično ne prelazi vrednost 2,5, sem kod dugih vodova. Stacionarni faktor prenapona nije veći od $1{,}1 \cdot 1{,}73 = 1{,}9$. Mogući su i prenaponi usled ferorezonanse kod nesimetrije mreže i komutacija, ali su ovi retki.

Oštećenja na mestu kvara su mala zbog neznatnih struja kvara. Iz istog razloga nije teško, sa malim troškovima, postići željenu bezbednost od opasnih napona dodira i koraka.

Uticaji na telekomunikacione vodove usled magnetne indukcije i struje kroz tlo zanemarljivi su. Kod vazdušnih vodova može se ispoljiti nepovoljan uticaj električnog polja, naročito pri trajnijem radu u zemljospoju. U istim okolnostima moguće su i radiosmetnje.

Pogon mreže je jednostavan. Imaju se jedino teškoće pri otkrivanju zemljospojeva, ako ne postoji odgovarajuća signalizacija ili zaštita. Izbegavaju se prekidi pogona kod prolaznih zemljospojeva. Ako postoji mogućnost rezerviranja, takođe se i trajni jednofazni zemljospojevi mogu otkloniti bez uznemiravanja potrošača.

Da bi se održao potrebni nivo izolacije, poželjna su redovna profilaktička ispitivanja mreže povišenim naponom, naročito kod kablovskih mreža, koje mogu da sadrže latentne kvarove.

Investicioni troškovi za uzemljenje neutralne tačke su mali. Kod primene zaštite sa APU potrebno je ugraditi prekidače sa odgovarajućim ciklusima operacija. Povećani broj operacija skraćuje remontne rokove i vek prekidača.

Mreža treba da bude izvedena sa punim izolacionim nivoom za svoj nazivni napon.

Mreža sa izolovanom neutralnom tačkom može da radi paralelno sa kompenzovanom mrežom ili da se iz nje rezervira. Pri tom treba uskladiti podešenje prigušnice. U izolovanoj mreži treba blokirati zemljospojnu zaštitu.

Kompenzovane mreže

Tehničke granice primenjivosti kompenzacije određene su uslovima samogašenja struje jedofaznog zemljospoja na mestu kvara, koja predstavlja mali deo ukupne kapacitivne struje mreže. Kompenzacijom se tako obezbeđuje samogašenje prolaznih jednofaznih zemljospojeva i kod dosta prostranih mreža.

Ograničenje može usloviti i verovatnoća dvostrukih zemljospojeva, kao i kod izolovanih mreža.

Intermitentni prenaponi se ne mogu pojaviti.

Faktori prenapona kod jednofaznih zemljospojeva isti su kao kod izolovanih mreža. Postoji opasnost od prenapona kod nesimetrija u mreži, kao i kod isključivanja zemljospojeva i drugih manipulacija, ako se pri tom ima nepovoljna konfiguracija mreže.

U pogledu oštećenja na mestu kvara i uticaja na telekomunikacione vodove i radiosmetnje uslovi su isti kao kod izolovanih mreža.

Pogon mreže je složen zbog potrebe kontrole podešenja prigušnice i pridržavanja određenim pravilima manipulacije. Imaju se, pored toga, osetne teškoće kod otkrivanja kvarova, naročito kod složenijih mreža. Zaštita odnosno selektivna signalizacija su složene i ne uvek pouzdane.

Može se, isto kao kod izolovanih mreža, obezbediti stalnost isporuke električne energije potrošačima.

Takođe su potrebna redovna profilaktička naponska ispitivanja stanja izolacije.

Investicioni troškovi su veći nego kod izolovanih mreža zbog potrebe ugradnje prigušnice sa pratećom opremom, kao i eventualne automatike za regulaciju prigušnice koja se može uvesti u cilju pojednostavljenja eksploatacije.

Teškoće sa zaštitom mogu se eliminisati ako se primeni kratkotrajno premošćenje prigušnice preko male impedanse. Ovim se povećavaju investicioni troškovi, kako zbog male impedanse (otpornika, reaktanse), tako i zbog radova na sistemu uzemljenja, potrebnih radi očuvanja nivoa sigurnosti od električnog udara.

Primena kompenzacije može se pokazati posebno ekonomičnom kod prostranih vazdušnih mreža, koje imaju veliki broj prolaznih jednofaznih zemljospojeva.

Uzemljenje preko male impedanse

Oblast primene uzemljenja preko male impedanse nema tehničkih granica. U nekim slučajevima, izuzetno, izvesna ograničenja mogu da uslove dimenzije otpornika.

Oštećenja na mestu zemljospoja veća su nego kod izolovanih ili kompenzovanih mreža ali se pravilnim izborom struje kvara mogu smanjiti. Ograničena oštećenja imaju tu pozitivnu stranu da olakšavaju otkrivanje mesta kvara. U mreži ne zaostaju latentni kvarovi, budući da se oštećena izolacija ne može regenerisati.

Razmatranom tehnikom uzemljenja isključuju se svi zemljospojevi kako trajnog, tako i prolaznog karaktera. Jednofazni zemljospoj ne prelazi u dvostruki zemljospoj ili u druge složenije kvarove.

Intermitentni prenaponi nisu mogući.

Maksimalni faktor prenapona zavisi od usvojene impedanse za uzemljenje i karakterističnih parametara mreže i može se kretati, u praktičnim uslovima, između 1,8 do 2,5. Faktor stacionarnog prenapona kod uzemljenja preko otpornika može da iznosi do 1,8 a kod uzemljenja preko reaktanse manji je od 1,73.

Prenaponi prema zemlji bilo koje vrste prigušuju se ispod vrednosti za izolovane ili kompenzovane mreže. Kod primene reaktanse moguće su, pri nepovoljnim konfiguracijama mreže i karakteristikama prekidača, komutacioni prenaponi zbog pražnjenja energije prigušnice.

Mreže su relativno jednostavne za održavanje i gradnju. Razmatrano rešenje je nešto složenije ako se primenjuje zemljospojna zaštita preko nultih komponenti struja, što je obično potrebno, kao i kod korišćenja APU. Navedena zaštita znatno je jednostavnija i pouzdanija od zaštita koje su potrebne kod izolovanih i kompenzovanih mreža.

Profilaktička naponska ispitivanja nisu potrebna.

Mogući su magnetni i galvanski uticaji na telekomunikacione vodove. U praktičnim uslovima pomenuti se uticaji lako održavaju u dozvoljenim granicama zbog umerenih struja kvara. Kod pravilnog izbora vrednosti impedanse ne treba očekivati ni teškoće u pogledu održavanja bezbednosti od opasnih napona na sistemu uzemljenja.

Pošto se isključuju i prolazni jednofazni zemljospojevi ne može se postići stalnost isporuke električne energije kao kod izolovanih i kompenzovanih mreža. Ako ne postoje uslovi za rezervno napajanje potrošača, mogu se imati povećane štete usled neisporučene energije i prekida napajanja. Navedene nepoželjne pojave otklanjaju se u znatnoj meri primenom APU. Pomenuta tehnika biće kod vazdušnih vodova često neophodna pošto se ovi odlikuju visokim procentom pravih prolaznih kvarova i velikim ukupnim brojem ovakvih kvarova.

Pogon i održavanje mreže su jednostavni. Veći nadzor zahtevaju samo elektrolitski otpornici.

Investiciona ulaganja su veća nego kod izolovane mreže a po pravilu manja nego kod kompenzacije. Izvesna dodatna ulaganja mogu se pojaviti zbog eventualnih radova na uzemljenjima TS i stubova, ako su usvojene velike vrednosti struja jednofaznog zemljospoja. Oprema se bira za puni izolacioni nivo koji odgovara nazivnom naponu. Pošto su stacionarni prenaponi kratkotrajni, mogu se postići izvesne uštede u izolaciji prema zemlji. Uvođenje APU može takođe da poveća troškove zbog bržeg starenja prekidača.

Mreža može raditi paralelno samo sa mrežama u kojima je primenjen isti način uzemljenja neutralne tačke i slične vrednosti impedansi za uzemljenje. Priključenje na direktno uzemljene mreže biće moguće samo ako se mogu održati bezbedni naponi na sistemu uzemljenja. Takođe će često biti potrebno prilagoditi podešenja relea.

Direktno uzemljenje

Tehnička ograničenja za direktno uzemljenje predstavljaju uslovi bezopasnosti u sistemu uzemljenja i magnetni i galvanski uticaji na telekomunikacione instalacije. U gradskim mrežama razmatranim rešenjem biće teško zadovoljiti i jedan i drugi od pomenutih uslova. Najveće struje koje će se moći dozvoliti kod mreža iz kojih se napajaju neposredno mreže niskog napona neće biti veće od reda 1500 A, a i to u slučajevima kada je u instalacijama potrošača obezbeđeno dobro izjednačavanje potencijala. Kod vazdušnih mreža, zbog teških uslova uzemljenja TS i stubova, granično moguće struje biće znatno manje.

U odnosu na uzemljenje preko male impedanse direktnim uzemljenjem postiže se veće sniženje prenapona prema zemlji, svih vrsta.

Maksimalni faktor prenapona pri nastanku jednofaznog zemljospoja po pravilu je manji od 2, a faktor stacionarnih prenapona nije veći od $0{,}8\sqrt{3}=1{,}38$.

Oštećenja na mestu kvara mogu da budu znatna.

Pogon i održavanje mreže su jednostavni.

Zaštita koja se može izvesti kao fazna, jednostavna je i pouzdana.

U pogledu stalnosti napajanja potrošača važi ono što je rečeno za mreže uzemljene preko male impedanse. Zbog velikih vrednosti struja zemljospoja može se očekivati da će određen broj prolaznih zemljospojeva preći u stabilne, tako da se primenom APU neće dobiti isti pozitivni efekti kao kod mreža uzemljenih preko male impedanse.

Investicioni troškovi sastoje se iz troškova uzemljenja i prekidača i APU. Moguće je koristiti opremu sa sniženim izolacionim stupnjem.

Pregled osnovnih karakteristika razmatranih načina uzemljenja neutralne tačke prikazan je u Tabeli 11.1. Naročito izraženo pozitivno svojstvo označeno je sa (+), a negativno, sa (—). Ako određeno svojstvo nije izrazito, ni u pozitivnom, ni u negativnom smislu, korišćena je oznaka (:).

11.2. OBLASTI PRIMENE

Budući da svi postojeći načini uzemljenja imaju izvesna pozitivna i negativna svojstva, način uzemljenja treba izabrati tako da u konkretnim uslovima određene mreže maksimalno dolaze do izražaja povoljna svojstva usvojenog rešenja a nepovoljna nebitno ometaju rad mreže ili se mogu izbeći uz male troškove.

Bitna svojstva mreže biće označena, radi jednostavnosti, sledećim simbolima:

I — postoji mogućnost intermitentnih prenapona,

S — postoje uslovi za samogašenje prolaznih jednofaznih zemljospojeva,

Z_k — ima se povećan broj prelazaka jednofaznih zemljospojeva u druge kvarove,

M — mreža sadrži električne mašine,

K — mreža je kablovska,

V — mreža je vazdušna.

Svojstva I, S i Z_k se kod postojećih mreža procenjuju na osnovu analize pogona, statističke obrade kvarova i poređenja sa raspoloživim podacima o drugim mrežama.

TABELA 11.1

Vrsta uzemljenja neutralne tačke	Verovatnoća pojave opasnih prenapona: intermitentni	Verovatnoća pojave opasnih prenapona: kod zemljospoja: nastanak	Verovatnoća pojave opasnih prenapona: kod zemljospoja: isključenje	Verovatnoća pojave opasnih prenapona: drugi prenaponi	Stalnost isporuke električne energije	Zemlj. zaštita: Složenost	Zemlj. zaštita: Troškovi	Troškovi uzemljenja	Utica j na telekomunikacione vodove	Troškovi uzemljenja neutralne tačke	Pogon i održavanje	Mogućnost pojave dvostrukih kvarova
Izolovana n.t. sa signal. z. s.	da (—)	ne izrazita (:)	da (—)	da (—)	da (+)	mala (+)	mali (+)	mali (+)	mali (+)	nema (+)	jednostavno (+)	da (—)
Izolovana n. t. sa z. s. zaštitom	(—)	(:)	(—)	(—)	ne	(:)	(:)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Kompenzacija	(:)	ne (+)	(:)	(—)	da (+)	da (—)	(:)	(—)	(—)	(—)	(:), (—)	(:)
Kompenzacija sa premoščenjem	(:)	(+)	(:)	(—)	(+)	(+)	(—)	(:), (—)	(:), (—)	(—)	(:), (—)	(:)
Uzemljenje preko otpornika	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)*	(+)	(:)	(:), (—)	(:), (—)	(:)	(+), (:)	(+)
Uzemljenje preko male reaktanse	(+)	(+)	(:)	(:)	(+)*	(+)	(:) (+)	(:), (—)	(:), (—)	(:)	(+)	(+)
Direktno uzemljenje	(+)	(+)	(:)	(+)	(:)*	(+)	(+)	(—)	(—)	(:)	(+)	(+)

* U slučaju primene APU

Kod novih mreža biće potrebno izvesno predviđanje pogonskih svojstava. Dobru orijentaciju u pomenutom smislu daju Poglavlje 8., Odeljak 9.1, kao i Tačke 3.2.4, 3.4.3, 3.7.1, 3.8.3 i 3.8.4.

Za opis određene mreže biće korišćena algebra propozicija. Ako A i B predstavljaju dva svojstva mreže, operacija množenja (konjunkcija) AB, označava da mreža ima i svojstvo A i svojstvo B. Zbir (disjunkcija) $A+B$ označava da mreža ima ili svojstvo A ili svojstvo B ili oba svojstva. Simbol negacije $\bar{A}$ ukazuje da mreža nema svojstvo A.

Kao dobra orijentacija kod izbora povoljnih načina uzemljenja, za nekoliko karakterističnih slučajeva, može poslužiti Tabela 11.2.

TABELA 11.2

Br.	Karakteristike mreže	Preporučljiv način uzemljenja neutralne tačke
1	IVM	izolovana ili mala impedansa
2	$I(K+M\bar{V})$	mala impedansa
3	$\bar{I}\bar{M}$	mala impedansa
4	$S\bar{I}\bar{M}\bar{Z}_k V$	izolovana ili mala impedansa uz APU
5	$S\bar{I}\bar{M}\bar{Z}_k K$	izolovana ili mala impedansa
6	$\bar{S}\bar{M}\bar{Z}_k$	kompenzacija ili mala impedansa sa ili bez APU
7	$S\bar{I}\bar{M}Z_k V$	mala impedansa uz APU
8	$S\bar{I}\bar{M}Z_k K$	mala impedansa sa ili bez APU ili direktno

Kod mešovitih mreža može se primeniti rešenje za kablovske ili vazdušne mreže, zavisno od broja i ukupne dužine kablovskih i vazdušnih vodova. Ako se usvojenim rešenjem predviđa isključivanje jednofaznih zemljospojeva, kod vazdušnih vodova je poželjna primena APU.

Kada u mreži postoje neposredno priključene električne mašine, ne sme se dozvoliti trajan rad sa jednofaznim zemljospojem ako je struja zemljospoja veća od 5 A. Veće struje dovode do ozbiljnih oštećenja magnetnog kola mašina kod zemljospoja u namotaju. U slučaju 1, ako su struje zemljospoja manje od navedene granične vrednosti, može se raditi sa izolovanom neutralnom tačkom bez posebne bojazni od intermitentnih prenapona. Mašine se po potrebi mogu zaštititi od pomenutih prenapona ventilnim odvodnicima (Tačka 3.6.1). U obzir dolazi i uzemljenje preko male impedanse. Kod kapacitivnih struja zemljospoja većih od 5 A trebalo bi primeniti uzemljenje preko male impedanse.

Kod većih kapacitivnih struja mreže struja zemljospoja ne može se pouzdano ograničiti na vrednost ispod 5 A kompenzacijom zbog nesavršenosti podešavanja

i uticaja aktivne komponente struje zemljospoja i viših harmonika. Zbog toga u slučaju 3 kao generalno rešenje dolazi u obzir samo uzemljenje preko male impedanse.

Kod opredeljivanja između alternativnih načina uzemljenja kao i kod izbora pojedinih pratećih rešenja (oprema, vrste zaštite, signalizacije i automatike i dr.) treba za svaku konkretnu situaciju izvesti dodatne analize. Dobra odluka se može doneti na osnovu proračuna ukupnih troškova u veku eksploatacije, investicionih troškova, kao i na osnovu procena jednostavnosti izvođenja, održavanja i pogona, i mogućnosti uklapanja u postojeće stanje. Zavisno od raspoloživih sredstava i kadrova pri odlučivanju će se najveći značaj dati jednim ili drugim svojstvima rešenja.

11.3. RAZVOJ U BUDUĆNOSTI

U perspektivi treba očekivati porast instalisanih snaga i smanjivanje ukupnih dužina vodova mreža zbog porasta opterećenja po jedinici površine konzuma. Zahtevi u odnosu na kontinualno napajanje potrošača uopšte, a posebno osetljivih potrošača kao što su sistemi za obradu podataka i drugi elektronski uređaji, vremenom će postajati sve oštriji što će se odraziti na cenu šteta usled prekida napajanja. U gradskim mrežama će porasti i troškovi traženja kvara i opravke zbog radova na otkopavanju kabla.

Pomenute okolnosti zahtevaće neprekidno usavršavanje tehnika uzemljenja. Budući da postojeći uslovi u mrežama, iskustvo i tradicija znatno utiču na izbor načina uzemljenja, može se smatrati da će se svi mogući načini uzemljenja primenjivati i ubuduće, bar dosta dugo vremena. Svi će se oni, da bi odgovorili povećanim zahtevima potrošača i dalje usavršavati uz široku primenu automatike.

Pogon sa izolovanom neutralnom tačkom zadržaće se verovatno kod vazdušnih mreža sa malim strujama zemljospoja. Može se pretpostaviti da će se, u cilju obezbeđenja nesmetane isporuke energije, primenjivati u većoj meri nego do sada zemljospojna zaštita sa APU. Takođe će se koristiti i automatska preključivanja u mreži u cilju obezbeđivanja rezervnog napajanja.

Kod vazdušnih mreža sa velikim strujama zemljospoja koristiće se ili kompenzacija ili uzemljenje preko male impedanse uz APU, sa ili bez zemljospojnog prekidača. Kod kompenzacije težiće se automatskoj regulaciji prigušnice i selektivnoj zaštiti ili signalizaciji.

Prava oblast primene uzemljenja preko male impedanse biće i nadalje kablovske mreže zbog malog broja kvarova, uopšte, a posebno prolaznih jednofaznih zemljospojeva. Ovde će se težiti automatskoj selektivnoj eliminaciji neispravne deonice i prebacivanju na rezervno napajanje. U slučaju da je na području mreže izjednačen potencijal povezivanjem svih metalnih instalacija u tlu i temelja zgrada, moći će se primenjivati i direktno uzemljenje mreža uz jednostavnu faznu zaštitu. Ovim će se pojednostaviti i učiniti ekonomičnijim izgradnja i održavanje mreže. Uz odgovarajući napor i kvalitetno održavanje u razmatranim mrežama moći će se, sa dobrim uspehom, koristiti i kompenzacija. Ovde će se takođe težiti automatskoj regulaciji prigušnice i selektivnoj signalizaciji ili zaštiti.

Za dovoljno sigurno opredeljivanje između otpornika ili prigušnice, kod uzemljenja preko male impedanse, biće potrebno više pogonskih iskustava i ispiti-

vanja. Otpornostima se efikasnije ograničavaju prelazni prenaponi ali se željeno prigušenje obično može postići i reaktansom. Kod viših nazivnih napona i struja otpornik, međutim, ima dosta veće dimenzije od prigušnice. Vodeni otpornik, pored toga, zahteva i redovni nadzor i održavanje. Uzemljenje preko reaktanse ostvaruje se jednostavno i u mrežama kod kojih izvorni transformator nema neutralnu tačku, primenom transformatora za uzemljenje. Osnovni nedostatak prigušnice sastoji se u tome što može da prouzrokuje opasne prenapone pri komutacijama prekidača. Pojava je verovatnija kada je struja jednofaznog zemljospoja podešena na niže vrednosti, reda nekoliko stotina ampera. Ako bi se ustanovilo da se određenim izborom prekidača i drugim merama mogu izbeći pomenuti prenaponi, trebalo bi dati prigušnici prednost u odnosu na otpornik.

PRILOZI

I. LAPLASOVA TRANSFORMACIJA

I.1. DEFINICIJA I OSNOVNA SVOJSTVA

Laplasova transformacija ($\mathscr{L}$-transformacija) funkcije $f(t)$ definiše se kao

$$\mathscr{L}\{f(t)\}=\int_0^\infty e^{-st}f(t)\,dt. \tag{I.1}$$

Radi jednostavnijeg pisanja, umesto oznake $\mathscr{L}\{f(t)\}$ za označavanje $\mathscr{L}$-transformacije koristićemo, bilo simbol $\tilde{f}(s)$ bilo, prosto, $\tilde{f}$.

Funkcija $f(t)$ obično se naziva originalom.

$\mathscr{L}$-transformacijom funkcija $f(t)$ prevodi se u funkciju $\tilde{f}(s)$ kompleksnog operatora s. Funkcija $\tilde{f}(s)$ ima određena pozitivna svojstva koja mogu da olakšaju proračun originala $f(t)$ kada je ovaj određen linearnim diferencijalnim jednačinama sa konstantnim koeficijentima. U našim razmatranjima $f(t)$ su linearne veličine električnih kola a argument t predstavlja vreme.

Da bi postojala $\mathscr{L}$-transformacija $f(t)$, pomenuta funkcija — original treba da zadovolji uslove:

a. da bude neprekidna ili bar intervalno neprekidna,

b. da bude ograničena u smislu

$$|f(t)|\leqslant Me^{\alpha t}, \tag{I.2}$$

gde su M i α proizvoljne realne pozitivne konstante.

Budući da je po definiciji $\mathscr{L}$-transformacija određena vrednostima $f(t)$ pri $t\geqslant 0$, to ona ne odražava navedenu funkciju za vrednosti $t<0$. Određenosti radi, u matematici se usvaja

$$f(t)=0. \tag{I.3}$$
$$t<0$$

Saglasno (I.3) je

$$f(0)=\lim_{\substack{t\to 0\\ t>0}} f(t) \tag{I.4}$$

Konvencija (I.3) je bez značaja za praktičnu primenu u analizi prelaznih procesa, pošto se u ovakvim analizama po pravilu proučavaju tokovi veličina počev od trenutka nastanka određenih promena, koji se usvaja kao početak za merenje vremena.

Tabela I.1 daje $\mathcal{L}$-transformacije nekoliko važnih operacija nad funkcijama — originalima, koje mogu poslužiti kod izvođenja izraza za $\mathcal{L}$-transformacije pojedinih funkcija odnosno za transformisanje različitih integro-diferencijalnih jednačina. Navedene $\mathcal{L}$-transformacije izvode se jednostavno [I.1, I.2], neposrednom primenom definicije (I.1).

U tabeli I.2 date su $\mathcal{L}$-transformacije više karakterističnih funkcija — originala [I.1]. U literaturi postoje znatno potpunije tabele [I.3]. Navedeni izrazi dobijaju se takođe neposredno primenom (I.1).

TABELA I.1

	Original	$\mathcal{L}$ — transformacija
1. a	$\sum_{k=1}^{n} A_k f_k(t)$	$\sum_{k=1}^{n} A_k \tilde{f}_k(s)$
1. b	$f(\lambda t)$	$\frac{1}{\lambda}\tilde{f}\left(\frac{s}{\lambda}\right)$
1. c	$e^{\lambda t} f(t)$	$\tilde{f}(s-\lambda)$
1. d	$f(t-\tau)$	$e^{-s\tau}\tilde{f}(s)$
1. e	$\frac{\partial f(t, x)}{\partial x}$	$\frac{\partial \tilde{f}(s, x)}{\partial x}$
1. f	$f^{(n)}(t)$	$s^n \tilde{f}(s) - s^{n-1} f(0) - \cdots - f^{(n-1)}(s)$
1. g	$\int_0^t dt_n \int_0^{t_n} dt_{n-1} \cdots \int_0^{t_2} f(t_1)\, dt_1$	$\frac{\tilde{f}(s)}{s^n}$
1. h	$-t f(t)$	$\frac{d\tilde{f}(s)}{ds}$
1. i	$\frac{f(t)}{t}$	$\int_s^{\infty} \tilde{f}(s) \cdot ds$
1. j	$f * g \equiv \int_0^t f(\tau)\, g(t-\tau)\, d\tau$	$\tilde{f}(s)\,\tilde{g}(s)$
1. k	$f' * g + f(0)\, g(t) \equiv g' * f + g(0)\, f(t)$	$s\tilde{f}(s)\,\tilde{g}(s)$

TABELA I.2

	Original	$\mathcal{L}$ — transformacija
2. a	1	$1/s$
2. b	e^{at}	$1/(s-a)$
2. c	$\sin \omega t$	$\omega/(s^2+\omega^2)$
2. d	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$
2. e	$\operatorname{sh} \omega t$	$\frac{\omega}{s^2-\omega^2}$
2. f	$\operatorname{ch} \omega t$	$\frac{s}{s^2-\omega^2}$
2. g	$e^{at} \sin(\omega t+\varphi)$	$\frac{\omega \cos\varphi + (s-a)\sin\varphi}{(s-a)^2+\omega}$
2. h	$e^{at} \cos(\omega t+\varphi)$	$\frac{(s-a)\cos\varphi - w\sin\varphi}{(s-a)^2+\omega^2}$
2. i	t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
2. j	$t^n e^{at}$	$\frac{n!}{(s-a)^{n+1}}$
2. k	$t \sin(\omega t)$	$\frac{2s\omega}{(s^2+\omega^2)^2}$
2. l	$t \cos(\omega t)$	$\frac{s^2-\omega^2}{(s^2+\omega^2)^2}$
2. m	$t \operatorname{sh}(\omega t)$	$\frac{2s\omega}{(s^2-\omega^2)^2}$
2. n	$t \operatorname{ch}(\omega t)$	$\frac{s^2+\omega^2}{(s^2-\omega^2)^2}$

I.2. GRANIČNE TEOREME

Iz (I.1) sledi, s obzirom na (I.2),

$$\lim_{\mathrm{Re}\,\{s\}\to\infty} \tilde{f}(s)=0 \tag{I.5}$$

Ako je funkcija $\tilde{f}(s)$ analitička u beskonačnosti [I.1], što je po pravilu slučaj u analizama električnih mreža, umesto (I.5) može se pisati

$$\lim_{s\to\infty} f(s)=0. \tag{I.6}$$

Relacije (I.5) odnosno (I.6) mogu poslužiti za proveru da li određene operatorske funkcije do kojih se dolazi u toku proračuna predstavljaju $\mathscr{L}$-transformacije nekih originala, kao i za kontrolu proračuna.

Na osnovu (I.1) dobija se takođe

$$\lim_{s\to 0} \tilde{f}(s)=\int_0^\infty f(t)\,dt. \tag{I.7}$$

Formula (I.7) važi samo ako integral na desnoj strani postoji.

Na osnovu veze 1. f iz Tabele I.1 ima se [I.2]

$$s^n\tilde{f}(s)-s^{n-1}f(0)-\cdots-f^{(n-1)}(0)=\int_0^\infty e^{-st}f^{(n)}(t)\,dt. \tag{I.8}$$

Ako se u integralu u (I.8) uvede zamena $st=u$, pomenuti izraz dobija oblik

$$s^{n+1}\tilde{f}(s)-s^nf(0)-\cdots-sf^{(n-1)}(0)=\int_{L_1} e^{-u}f^{(n)}\left(\frac{u}{s}\right)du, \tag{I.9}$$

gde je sa L_1 označena poluprava u ravni u koja polazi iz koordinatnog početka.

Kako je

$$\lim_{s\to\infty}\int_{L_1} e^{-u}f\left(\frac{u}{s}\right)du=f^{(n)}(0)\int_{L_1}e^{-u}\,du=f^{(n)}(0)\,s\int_0^\infty e^{-st}\,dt=f^{(n)}(0),$$

na osnovu (I.9) može se pisati

$$\lim_{s\to\infty}[s^{n+1}\tilde{f}(s)-s^nf(0)-\cdots-sf^{(n-1)}(0)]=f^{(n)}(0). \tag{I.10}$$

Formula (I.10) predstavlja graničnu teoremu koja daje vezu između vrednosti n-tog izvoda originala pri $t=0$ i njegove $\mathscr{L}$-transformacije.

Kao poseban slučaj, iz (I.10) se za $n=0$, dobija

$$\lim_{s\to\infty} s\tilde{f}(s)=f(0). \tag{I.11}$$

Sličnim postupkom se pokazuje da takođe postoji i veza [I.2]

$$\lim_{s\to 0}[s^{n+1}\tilde{f}(s)-s^nf(0)-\cdots-sf^{(n-1)}(0)]=f^{(n)}(\infty). \tag{I.12}$$

Relacija (I.12) važi ako postoji integral

$$\int_0^\infty f^{(n+1)}(t)\,dt.$$

Za $n=0$ iz (I.12) se dobija, kao poseban slučaj,

$$\lim_{s\to 0} s\tilde{f}(s)=f(\infty). \tag{I.13}$$

Granične teoreme omogućavaju da se odrede izvesna svojstva funkcije — originala neposredno iz njene $\mathscr{L}$-transformacije, bez inverzije transformacije u oblast originala. Ovim se pojednostavljuju pojedine analize.

I.3. INVERZIJA LAPLASOVE TRANSFORMACIJE

Pod inverzijom $\mathscr{L}$-transformacije podrazumeva se određivanje $f(t)$ iz poznatog $\tilde{f}(s)$.

Saglasno (I.1), nalaženje originala svodi se na izračunavanje $f(t)$ iz integralne jednačine

$$\int_0^\infty e^{-st}f(t)\,dt=\tilde{f}(s) \tag{I.14}$$

što se formalno označava

$$f(t)=\mathscr{L}^{-1}\{\tilde{f}(s)\}.$$

Pomenuti zadatak, mada dosta složen generalno, može se u najvećem broju slučajeva koji se imaju u praktičnoj primeni relativno lako rešiti.

Neka je $\tilde{f}(s)$ racionalna funkcija

$$\tilde{f}(s)=\frac{A(s)}{B(s)} \tag{I.15}$$

gde su $A(s)$ i $B(s)$ polinomi. Saglasno (I.6) stepen $B(s)$ mora biti viši od stepena $A(s)$. Oblik (I.15) karakterističan je za električne mreže.

Za $\tilde{f}(s)$ kao (I.15) pokazuje se [I.1, I.2] da je rešenje jednačine (I.14)

$$f(t)=\sum\frac{1}{(n_k-1)!}\lim_{s\to a_k}\left[(s-a_k)^{n_k}\frac{A(s)}{B(s)}e^{st}\right]^{(n_k-1)}. \tag{I.16}$$

U (I.16) smo sa a_k označili nule $B(s)$ a sa n_k višestrukost nula. Suma u (I.16), rasprostire se na sve korene a_k. Višestruki koreni obuhvataju se jednom.

Ako se $B(s)$ napiše kao

$$B(s)=(s-a_k)^{n_k} B_k(s), \tag{I.17}$$

formula (I.16) dobija oblik

$$f(t)=\sum \frac{1}{(n_k-1)!}\left[\frac{A(s)}{B(s)} e^{st}\right]^{(n_k-1)}_{s=a_k} \tag{I.18}$$

koji je podesniji za primenu.

Kada su svi koreni a_k prosti, tj. $n_k=1$, iz (I.18) se dobija

$$f(t)=\sum \frac{A(a_k)}{B_k(a_k)} e^{a_k t}. \tag{I.19}$$

Kako je prema (I.17)

$$B'(s)=n_k(s-a_k)^{n_k-1} B_k(s)+(s-a_k)^{n_k} B_k'(s), \tag{I.20}$$

za $n_k=1$ i $s=a_k$ ima se

$$B'(a_k)=B_k(a_k). \tag{I.21}$$

S obzirom na (I.21) iz (I.19) se dobija

$$f(t)=\sum \frac{A(a_k)}{B'(a_k)} e^{a_k t}. \tag{I.22}$$

Formula (I.22) često se naziva Hevisajdovim (Heaviside) razvitkom [I.4].

Na osnovu (I.18) odnosno (I.22) mogu se izvesti posebne formule za pojedine karakteristične slučajeve.

Razmotrićemo prvo slučaj $n_k=1$, $a_1=0$.

U skladu sa (I.20) biće

$$B'(s)=B_1(s)+sB_1(s) \tag{I.23}$$

Na osnovu (I.23) neposredno sledi

$$B'(0)=B_1(0) \tag{I.24}$$

i, pošto je svako a_k, $k>1$, koren $B_1(s)$,

$$B'(a_k)=B_1(a_k)+a_k B_1'(a_k)=a_k B_1'(a_k),\ k>1 \tag{I.25}$$

Kada se ima u vidu (I.24) i (I.25), formula (I.22) može se napisati u obliku

$$f(t)=\frac{A(0)}{B_1(0)}+\sum_{k>1}\frac{A(a_k)}{a_k B_1'(a_k)} e^{a_k t}. \tag{I.26}$$

Prvi član u (I.26) odnosi se na koren a_1 a drugi na ostale korene $B(s)$.

Od praktičnog značaja se može smatrati i slučaj kada je $n_k=1$, a $B(s)$ sadrži parove konjugovano kompleksnih korena, što je karakteristično za polinome $B(s)$ sa realnim koeficijentima, kakvi se imaju kod električnih mreža.

Neka su a_1 i a_2 konjugovano kompleksni koreni $B(s)$

$$a_1=-\delta_1+j\omega_1$$
$$a_2=a_1^*=-\delta_1-j\omega_1. \tag{I.27}$$

Može se napisati

$$B(s)=(s+\delta_1-j\omega_1)(s+\delta_1+j\omega_1) B_2(s)=$$
$$=(s^2+2\delta_1 s+\Omega_1^2) B_2(s) \tag{I.28}$$

gde smo označili

$$\Omega_1^2=\delta_1^2+\omega^2. \tag{I.29}$$

Iz (I.28) sledi

$$B'(s)=2(s+\delta_1) B_2(s)+(s^2+2\delta_1 s+\Omega_1^2) B_2'(s). \tag{I.30}$$

Na osnovu (I.30) biće, očigledno,

$$B'(a_k)=\begin{cases} 2(a_k+\delta_1) B_2(a_k) & k=1,\ 2 \\ (a_k^2+2\delta_1 a_k+\Omega_1^2) B_2'(a_k) & k>2. \end{cases} \tag{I.31}$$

S obzirom na (I.31), izraz (I.22) može se napisati u obliku

$$f(t)=\frac{A(a_1)}{2(a_1+\delta_1) B_2(a_1)} e^{a_1 t}+\frac{A(a_2)}{2(a_2+\delta_1) B_2(a_2)} e^{a_2 t}+$$
$$+\sum_{k>2}\frac{A(a_k)}{(a_k^2+2\delta_1 a_k+\Omega_1^2) B_2'(a_k)} e^{a_k t} \tag{I.32}$$

Kada se ima u vidu (I.27), prva dva člana u (I.31) predstavljaju konjugovano kompleksne veličine, tako da se može pisati

$$f(t)=2\,\mathrm{Re}\left\{\frac{A(a_1)}{2(a_1+\delta_1) B_2(a_1)} e^{a_1 t}\right\}+$$
$$+\sum_{k>2}\frac{A(a_k)}{(a_k^2+2\delta_1 a_k+\Omega_1^2) B_2'(a_k)} e^{a_k t}$$

ili, kada se uvrsti izraz za a_1,

$$f(t)=\mathrm{Re}\left\{\frac{A(-\delta_1+j\omega_1)}{j\omega_1 B_2(-\delta_1+j\omega_1)} e^{j\omega_1 t}\right\} e^{-\delta_1 t}+$$
$$+\sum_{k>2}\frac{A(a_k) e^{a_k t}}{(a_k^2+2\delta_1 a_k+\Omega_1^2) B_2'(a_k)}. \tag{I.33}$$

Ako su i a_3 i a_4 konjugovano kompleksni koreni $B(s)$

$$a_3 = -\delta_2 - j\omega_2$$

$$a_4 = a_3^* = -\delta_2 - j\omega_2, \tag{I.34}$$

moglo bi se napisati

$$B_2(s) = (s^2 + 2\delta_2 s + \Omega_2^2) B_4(s). \tag{I.35}$$

U (I.34) smo označili

$$\Omega_2^2 = \delta_2^2 + \omega_2^2. \tag{I.36}$$

Analogno (I.31), važi

$$B_2'(a_k) = \begin{cases} 2(a_k + \delta_2) B_4(a_k) & k = 3,\ 4 \\ (a_k^2 + 2\delta_2 a_k + \Omega_2^2) B_4'(a_k) & k \neq 3,\ 4. \end{cases} \tag{I.37}$$

S obzirom na (I.37), drugi član u (I.33) može se takođe razložiti na delove koji se odnose na korene a_3 i a_4 i na ostale korene a_k, $k > 4$. Postupak razlaganja je isti kao kod prevođenja (I.22) u (I.33).

Iz (I.33) tako se za razmatrani slučaj dobija

$$f(t) = \mathrm{Re}\left\{ \frac{A(a_1)}{j\omega_1 (a_1^2 + 2\delta_2 a_1 + \Omega_2^2) B_4(a_1)} e^{j\omega_1 t} \right\} e^{-\delta_1 t} + \\ + \mathrm{Re}\left\{ \frac{A(a_3)}{j\omega_2 (a_3^2 + 2\delta_1 a_3 + \Omega_1^2) B_4(a_3)} e^{j\omega_2 t} \right\} e^{-\delta_2 t} + \\ + \sum_{k>4} \frac{A(a_k)}{(a_k^2 + 2\delta_1 a_k + \Omega_1^2)(a_k^2 + 2\delta_2 a_k + \Omega_2^2) B_4'(a_k)} e^{a_k t} \tag{I.38}$$

Na sličan se način može izvesti i formula za $f(t)$ kada $B(s)$ ima tri i više parova konjugovano kompleksnih korena.

I.4. PRIMENA

Primenu $\mathcal{L}$-transformacije ilustrovaćemo na analizi prelaznog procesa koji se uspostavlja u jednom rednom R, L, C kolu kada se na krajeve ovog kola uključi napon u čija se promena u vremenu poznaje. Treba izračunati vremenski tok struje u kolu od trenutka priključenja napona.

Kao što je poznato, saglasno zakonima električnih kola, struja i napon povezani su sledećim jednačinama

$$u = Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{q}{C} \tag{I.39}$$

$$\frac{dq}{dt} = i, \tag{I.40}$$

Kada se na (I.39) i (I.40) primeni $\mathcal{L}$-transformacija prema (I.1) i ima u vidu veza 1.f u Tabeli I.1, dobija se

$$\tilde{u} = R\tilde{i} + sL\tilde{i} - Li(0) + \frac{\tilde{q}}{C} \tag{I.41}$$

$$s\tilde{q} - q(0) = \tilde{i} \tag{I.42}$$

Ako se $\tilde{q}$ izrazi preko $\tilde{i}$ prema (I.42) i nađena relacija uvrsti u (I.41), posle sređivanja se dobija

$$\tilde{u} + Li(0) - \frac{q(0)}{C} = Z(s)\tilde{i} \tag{I.43}$$

gde se

$$Z(s) = R + sL + \frac{1}{sC} \tag{I.44}$$

može nazvati operatorskom impedansom kola.

Na osnovu (I.43) ima se

$$\tilde{i} = \frac{1}{Z(s)}\left[\tilde{u} + Li(0) - \frac{1}{C} q(0)\right]. \tag{I.45}$$

Budući da su sve veličine na desnoj strani (I.45) poznate, vremenski tok struje izračunava se inverzijom $\mathcal{L}$-transformacije u vremenski domen

$$i = \mathcal{L}^{-1}\left\{ \frac{1}{Z(s)}\left[\tilde{u} + Li(0) - \frac{1}{C} q(0)\right] \right\} \tag{I.46}$$

čime je postavljeni zadatak rešen.

Kako se vidi iz trivijalnog primera koji je razmatran, primenom $\mathcal{L}$-transformacije se diferencijalno-integralne operacije nad originalima prevode u algebarske operacije $\mathcal{L}$-transformacija. $\mathcal{L}$-transformacije analiziranih veličina se izračunavaju jednostavnim algebarskim metodama.

Preko $\mathcal{L}$-transformacije u proračunima se neposredno obuhvataju početne vrednosti razmatranih veličina, što nije slučaj kod klasičnog postupka rešavanja diferencijalnih jednačina.

Korišćenjem $\mathcal{L}$-transformacije mogu se koncizno, preko odgovarajućih operatorskih impedansi i admitansi, obuhvatiti složena dinamička svojstva mreža, što je podesno za različite opšte analize.

Kod složenih mreža se, u konkretnim proračunima, pojavljuju teškoće, kako u nalaženju izraza za analizirane veličine u operatorskom domenu, tako i kod inverzije nađenih izraza u vremenski domen. U mnogim ovakvim slučajevima biće celishodnija neposredna numerička integracija jednačina u vremenskom domenu.

U slučaju nultih početnih uslova (I.45) dobija oblik

$$\tilde{u} = Z(s)\tilde{i} \tag{I.47}$$

Relacija (I.47) je formalno slična izrazu koji važi za kompleksne amplitude veličina posmatranog kola u analizama stacionarnih prosto—periodičnih režima [I.4]

$$\underline{U}=\underline{Z}(j\omega)\,\underline{I}. \tag{I.48}$$

U (I.48) sa ω je označena kružna učestanost stacionarnog režima.

Poređenjem (I.47) i (I.48) dolazi se do zaključka da se na osnovu jedne od pomenutih relacija može lako, po jednostavnim formalnim pravilima napisati druga. Da bi se, na primer, dobila jednačina za kompleksne amplitude treba u (I.47) formalno zameniti s sa $j\omega$ i $\mathscr{L}$-transformacije napona i struja, kompleksnim amplitudama ovih veličina.

LITERATURA

I.1. I. G. Aramanovič, G. L. Lunc, L. E. Elsgolc: *Funkcije kompleksne promenljive, operacioni račun, teorija stabilnosti* (knjiga, na ruskom) „Nauka", Moskva 1965.

I.2. M. L. Levinštejn: *Operacioni račun u zadacima elektrotehnike* (knjiga, na ruskom) „Energija", Moskva 1972.

I.3. G. Doetsch: *Anleitung zum praktischen Gebrauch der Laplace — Transformation und der Z-Transformation* (knjiga) R. Oldenbourg, München, 1967.

I.4. R. Horvat: *Teorija električnih kola* (knjiga) „Građevinska knjiga", Beograd, 1959.

I.5. S. W. Direktor, R. A. Robrer: *Introduction to system theory* (knjiga) McGraw — Hill Kogakusha, Tokyo, 1972.

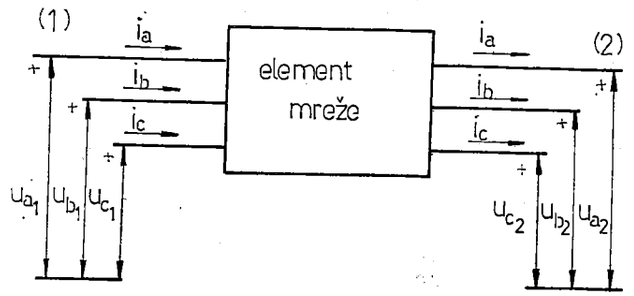
I.6. M. I. Kantorovič: *Operacioni račun i procesi u električnim kolima* (knjiga, na ruskom) „Nauka", Moskva 1964.

II. KOMPONENTE α, β, 0 VELIČINA TROFAZNIH ELEKTRIČNIH MREŽA

II.1. OPŠTE JEDNAČINE ELEMENATA MREŽE

Između veličina na krajevima elemenata trofazne električne mreže postoje sledeći odnosi (sl. II.1)

$$\begin{aligned}
\tilde{u}_{a1}-\tilde{u}_{a2}&=\tilde{z}_{aa}\,\tilde{I}_a+\tilde{z}_{ab}\,\tilde{I}_b+\tilde{z}_{ac}\,\tilde{I}_c\\
\tilde{u}_{b1}-\tilde{u}_{b2}&=\tilde{z}_{ba}\,\tilde{I}_a+\tilde{z}_{bb}\,\tilde{I}_b+\tilde{z}_{bc}\,\tilde{I}_c\\
\tilde{u}_{c1}-\tilde{u}_{c2}&=\tilde{z}_{ca}\,\tilde{I}_a+\tilde{z}_{cb}\,\tilde{I}_b+\tilde{z}_{cc}\,\tilde{I}_c
\end{aligned} \tag{II.1}$$



Sl. II. 1

Jednačine (II.1) napisane su za Laplasove transformacije veličina elemenata, u slučaju nultih početnih uslova. Sa $\tilde{z}$ su označene sopstvene i međusobne operatorske impedanse faza posmatranog elementa. Pomenute impedanse obeležene su, radi jednostavnosti, na isti način kao $\mathscr{L}$-transformacije napona i struja.

Najveći broj elemenata mreža poseduje, bar približno, cikličnu simetriju pri kojoj je

$$\begin{aligned}
\tilde{z}_{kk}&=\tilde{z}_s \qquad k=a,\ b,\ c\\
\tilde{z}_{ki}&=\tilde{z}_{ik}=\tilde{z}_M \qquad i,\ k=a,\ b,\ c,\ i\neq k.
\end{aligned} \tag{II.2}$$

II.2. STACIONARNI URAVNOTEŽENI REŽIM

U stacionarnom uravnoteženom radu mreže ima se

$$\tilde{I}_a+\tilde{I}_b+\tilde{I}_c=0. \tag{II.3}$$

S obzirom na (II.2) i (II.3), prva od jednačina (II.1) postaje

$$\tilde{u}_{a1}-\tilde{u}_{a2}=\tilde{z}_s\tilde{I}_a+\tilde{z}_M(\tilde{I}_b+\tilde{I}_c)=(\tilde{z}_s-\tilde{z}_M)\tilde{I}_a. \tag{II.4}$$

Isto se tako dobija:

$$\tilde{u}_{b1}-\tilde{u}_{b2}=(\tilde{z}_s-\tilde{z}_M)\tilde{I}_b, \tag{II.5}$$

$$\tilde{u}_{c1}-\tilde{u}_{c2}=(\tilde{z}_s-\tilde{z}_M)\tilde{I}_c. \tag{II.6}$$

Kako se vidi iz relacija (II.4) do (II.6), analiza rada elementa može se izvoditi za svaku fazu posebno, pošto je uticaj drugih dveju faza obuhvaćen u potpunosti ekvivalentnom »pogonskom« impedansom

$$\tilde{z}_p=\tilde{z}_s-\tilde{z}_M. \tag{II.7}$$

Kod stacionarnog uravnoteženog rada, veličine su prostoperiodične funkcije vremena i u fazama obrazuju simetrične sisteme direktnog redosleda, tako da je analizu režima dovoljno izvesti za jednu od faza, na primer fazu »*a*«. Otuda se, kao što je poznato, ovakvi režimi i proučavaju preko jednofazne šeme mreže za fazu »*a*«, sa pogonskim impedansama.

II.3. NESIMETRIČNI REŽIMI

Kada u električnoj mreži dođe do spoja jedne ili dve faze sa zemljom neće više važiti (II.3). Analiza rada elementa mreže i pored toga što je ovaj zadržao svoju cikličnu simetriju, morala bi se izvoditi trofazno, preko sistema jednačina (II.1). Trofazna analiza, naročito ako mreža sadrži mnogo elemenata, nije podesna, zbog velikog broja jednačina koje se moraju jednovremeno rešavati.

Ciklična simetrija elemenata mreže omogućava razlaganje pomenutih proračuna na nekoliko odvojenih etapa manjeg obima, uvođenjem podesnih transformacija faznih veličina.

Jednačine (II.1) mogu se prikazati matričnom relacijom

$$\|\tilde{u}_1\|-\|\tilde{u}_2\|=\|\tilde{z}\|\,\|\tilde{I}\|, \tag{II.8}$$

gde smo označili

$$\|\tilde{u}_1\|=\begin{Vmatrix}\tilde{u}_{a1}\\ \tilde{u}_{b1}\\ \tilde{u}_{c1}\end{Vmatrix},\qquad \|\tilde{u}_2\|=\begin{Vmatrix}\tilde{u}_{a2}\\ \tilde{u}_{b2}\\ \tilde{u}_{c2}\end{Vmatrix} \tag{II.9}$$

$$\|\tilde{I}\|=\begin{Vmatrix}\tilde{I}_a\\ \tilde{I}_b\\ \tilde{I}_c\end{Vmatrix}. \tag{II.10}$$

Matrica impedansi je, s obzirom na (II.2), oblika

$$\|\tilde{z}\|=\begin{Vmatrix}\tilde{z}_s & \tilde{z}_M & \tilde{z}_M\\ \tilde{z}_M & \tilde{z}_s & \tilde{z}_M\\ \tilde{z}_M & \tilde{z}_M & \tilde{z}_s\end{Vmatrix}. \tag{II.11}$$

Međusobna povezanost pojava u fazama, koja zahteva trofaznu analizu mreže, proizilazi otuda što u matrici $\|\tilde{z}\|$ postoje vandijagonalni elementi.

Uvedimo namesto faznih napona i struja njihove α, β, 0 komponente prema izrazima

$$v_\alpha=\frac{1}{3}(2v_a-v_b-v_c),$$

$$v_\beta=\frac{1}{\sqrt{3}}(v_b-v_c), \tag{II.12}$$

$$v_0=\frac{1}{3}(v_a+v_b+v_c).$$

Ovde smo *v* upotrebili kao opšti simbol za linearne veličine mreže — napone i struje.

Odnosi (II.12) mogu se opisati matričnom jednačinom

$$\begin{Vmatrix}v_\alpha\\ v_\beta\\ v_0\end{Vmatrix}=\|C\|\begin{Vmatrix}v_a\\ v_b\\ v_c\end{Vmatrix}, \tag{II.13}$$

gde je sa $\|C\|$ označena matrica transformacije

$$\|C\|=\frac{1}{3}\begin{Vmatrix}2 & -1 & -1\\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3}\\ 1 & 1 & 1\end{Vmatrix}. \tag{II.14}$$

Fazne veličine se izračunavaju iz svojih α, β, 0 komponenti, na osnovu (II.13), kao

$$\begin{Vmatrix}v_a\\ v_b\\ v_c\end{Vmatrix}=\|C\|^{-1}\begin{Vmatrix}v_\alpha\\ v_\beta\\ v_0\end{Vmatrix}. \tag{II.15}$$

Pri tom je

$$\|C\|^{-1}=\begin{Vmatrix}1 & 0 & 1\\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1\\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1\end{Vmatrix}. \tag{II.16}$$

Relaciji (II.15) odgovaraju skalarne jednakosti

$$v_a = v_\alpha + v_o,$$

$$v_b = -\frac{v_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} v_\beta + v_o, \qquad \text{(II.17)}$$

$$v_c = -\frac{v_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} v_\beta + v_o.$$

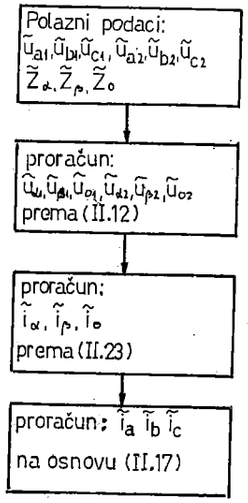
Kako se vidi iz (II.17), fazne veličine razlažu se na tri trofazna redosleda: α-redosled sa komponentama v_α, $-\frac{v_\alpha}{2}$, $-\frac{v_\alpha}{2}$, β-redosled sa komponentama 0, $\frac{\sqrt{3}}{2}\vartheta_\beta$ i $-\frac{\sqrt{3}}{2}\vartheta_\beta$ i 0-redosled sa komponentama v_0, v_0, v_0. Komponente su nabrajane redom po fazama *a*, *b*, *c*.

Pomnožimo jednačinu (II.8) s leva sa matricom $\| C \|$ i izrazimo fazne struje preko α, β, 0 komponenti, u skladu sa (II.15).

Tako se dobijaju jednačine elemenata sa α, β, 0 komponentama

$$\begin{Vmatrix} \tilde{u}_{\alpha 1} \\ \tilde{u}_{\beta 1} \\ \tilde{u}_{o1} \end{Vmatrix} - \begin{Vmatrix} \tilde{u}_{\alpha 2} \\ \tilde{u}_{\beta 2} \\ \tilde{u}_{o2} \end{Vmatrix} = \| \tilde{z}_{\alpha,\beta,o} \| \begin{Vmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \\ \tilde{i}_o \end{Vmatrix}. \qquad \text{(II.18)}$$

Matrica impedansi $\| \tilde{z}_{\alpha,\beta,o} \|$ jednaka je



Sl. II. 2

$$\| \tilde{z}_{\alpha,\beta,o} \| = \| C \| \cdot \| \tilde{z} \| \cdot \| C \|^{-1}. \qquad \text{(II.19)}$$

Kada se izvedu operacije množenja prema (II.19) pokazuje se da je $\| \tilde{z}_{\alpha,\beta,o} \|$ dijagonalna matrica

$$\| \tilde{z}_{\alpha,\beta,o} \| = \begin{Vmatrix} \tilde{z}_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{z}_\beta & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{z}_o \end{Vmatrix}. \qquad \text{(II.20)}$$

sa elementima

$$\tilde{z}_\alpha = \tilde{z}_\beta = \tilde{z}_s - \tilde{z}_M \qquad \text{(II.21)}$$

$$\tilde{z}_o = \tilde{z}_s + 2\tilde{z}_M. \qquad \text{(II.22)}$$

Razvijanjem jednačine (II.18), s obzirom na (II.20), dobija se

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{\alpha 1} - \tilde{u}_{\alpha 2} &= \tilde{z}_\alpha \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{u}_{\beta 1} - \tilde{u}_{\beta 2} &= \tilde{z}_\beta \tilde{i}_\beta, \\ \tilde{u}_{o1} - \tilde{u}_{o2} &= \tilde{z}_o \tilde{i}_o. \end{aligned} \qquad \text{(II.23)}$$

Kako se vidi iz (II.20) i (II.23), prevođenjem faznih veličina u α, β, 0 komponente sistem jednačina (II.1) rastavljen je u tri autonomne jednačine za komponente,

koje se mogu odvojeno rešavati. Na osnovu (II.23), zaključuje se da se u pomenutim analizama elementi mreže prikazuju jednofazno preko impedansi za odgovarajući redosled. Šematski prikaz toka proračuna režima elemenata primenom α, β, 0 komponenti dat je na sl. II.2. Pretpostavljeno je da su poznati fazni naponi na krajevima elementa i da je potrebno odrediti fazne struje.

Iz (II.21) i (II.7) vidi se da se impedanse $\tilde{z}_\alpha$ i $\tilde{z}_\beta$ poklapaju sa $\tilde{z}_p$ i da se, prema tome, jednostavno izračunavaju iz pogonskih parametara elemenata, koji važe za stacionarni simetrični režim.

Impedansa $\tilde{z}_0$ se, isto tako, može odrediti iz standardnih podataka o parametrima elemenata za nulti redosled u okviru sistema simetričnih komponenata, pošto je nulti redosled u α, β, 0 transformaciji identično definisan.

LITERATURA

II.1. C. F. Wagner, R. D. Evans: *Symmetrical components* (knjiga) McGraw — Hill, New York 1933.

II.2. E. Clark: *Circuit analysis of A-C power systems* (knjiga) Wiley & Sons, New York 1950.

II.3. M. L. Levinštejn: *Operacioni račun u zadacima elektrotehnike* (knjiga, na ruskom) „Energija", Lenjingrad, 1972.

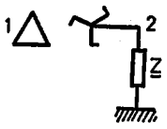
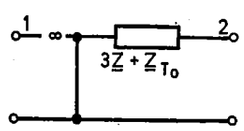
II.4. H. Koettnitz, H. Pundt: *Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze*, Band I (knjiga) VEB, Leipzig, 1973.

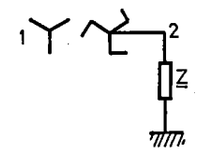
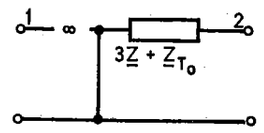
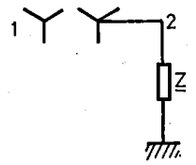
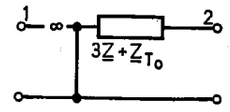
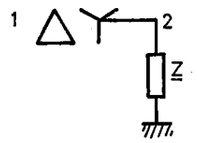
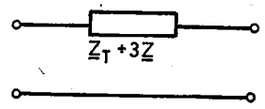
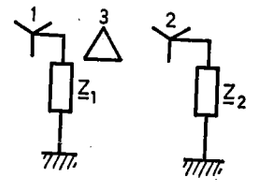
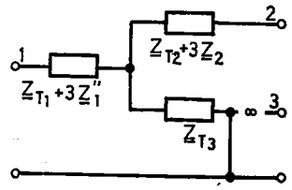
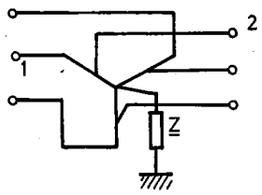
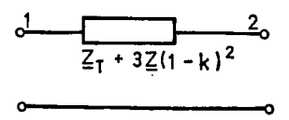
III. PODACI O ELEMENTIMA MREŽE

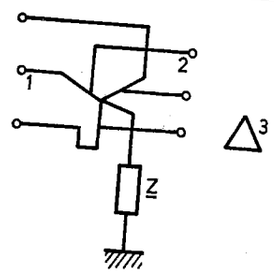
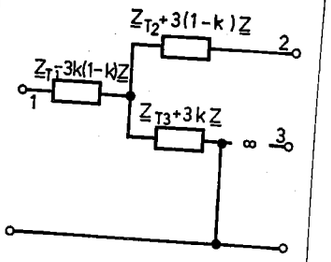
III. 1. ZAMENSKE ŠEME TRANSFORMATORA

U tabeli III.1 prikazane su zamenske šeme za dvonamotajne i tronamotajne transformatore uobičajenih sprega [118, 119]. Svi parametri šema svedeni su na stranu namotaja 2. Izostavljene su impedanse magnećenja.

TABELA III. 1

Sprega transformatora	Zamenska šema	Primedbe
Pogonski parametri		
Dvonamotajni		Nezavisno od sprege namotaja i uzemljenja neutralne tačke
Tronamotajni		
Nulti parametri		
		$X_{T_0} \approx 0{,}1\ X_T$ $R_{T_0} \approx 0{,}5\ R_T$

Sprega transformatora	Zamenska šema	Primedbe
Nulti parametri		
		$X_{T_0} \approx 0{,}1\ X_T$ $R_{T_0} \approx 0{,}5\ R_T$
		$X_{T_0} \approx (3 \div 10)\ X_T$ [1] $R_{T_0} \approx R_T$
		
		
		$k \equiv \frac{U_{2n}}{U_{1n}}$

Sprega transformatora	Zamenska šema	Primedbe
Nulti parametri		
		$k \equiv \frac{U_{2n}}{U_{1n}}$

1) Odnosi se na trofazne transformatore sa tri jezgra. Parametre X_{T0} i R_{T0} najbolje je utvrditi merenjem.

III. 2. ELEKTRIČNI PARAMETRI VODOVA

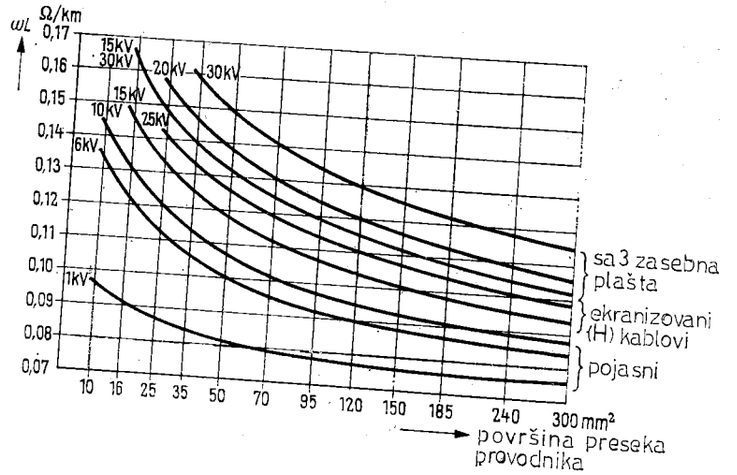
U Tabeli III.2 date su aktivne otpornosti za bakarne i aluminijumske provodnike različitih preseka pri 20 °C u Ω/km. Kod aluminijum — čelik provodnika obuhvata se samo presek aluminijuma [4].

TABELA III.2

Površina preseka mm²	Aktivna otpornost Ω/km			
	Vazdušni vodovi		Kablovski vodovi	
	Bakar	Aluminijum	Bakar	Aluminijum
10	1,784	3,03	1,79	3,03
16	1,115	1,895	1,121	1,90
25	0,714	1,212	0,722	1,22
35	0,510	0,866	0,518	0,874
50	0,357	0,606	0,366	0,615
70	0,255	0,433	0,265	0,443
95	0,188	0,319	0,200	0,331
120	0,149	0,253	0,161	0,265
150	0,119	0,202	0,131	0,214
185	0,0964	0,164	0,109	0,176
240	0,0744	0,126	0,087	0,138
300	0,0595	0,101	0,072	0,113
400	0,0446	0,0758	0,058	0,089

III. 2.1. KABLOVSKI VODOVI

Dijagram na sl. III.1 daje vrednosti pogonske reaktanse pri $f=50$ Hz za trofazne kablovske vodove različite konstrukcije [4, 118]. Kod kablova koji nemaju čeličnu armaturu reaktanse su za oko 10% manje.



Sl. III. 1

U Tabeli III.3 navedene su nulte impedanse pojedinih konstrukcija kablova prema podacima fabrike »Simens«, SR Nemačka [118].

TABELA III. 3

Vrsta kabla	Presek mm²	Nulta impedansa, $f=50$ Hz Ω/km
Trožilni, sa zajedničkim olovnim plaštom, za 10 kV	35	$1{,}27+j\,1{,}76$
	70	$1{,}15+j\,1{,}52$
	150	$1{,}13+j\,1{,}12$
Trožilni, sa tri olovna plašta, za 30 kV	50	$1{,}33+j\,0{,}92$
	95	$1{,}12+j\,0{,}74$
	150	$0{,}93+j\,0{,}62$
Jednožilni, uljni za 110 kV	120	$0{,}79+j\,0{,}30$
	185	$0{,}69+j\,0{,}27$
	300	$0{,}60+j\,0{,}24$

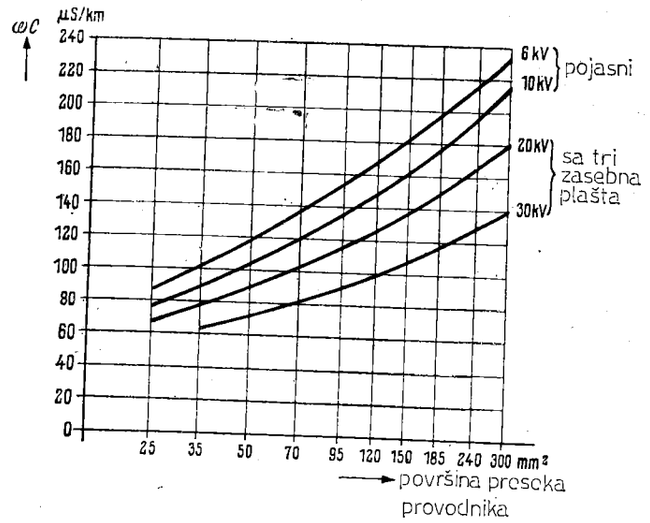
Merenjima, izvedenim u mreži 10 kV Beograda na kablovskim deonicama različitih dužina [73], ustanovljeno je da parametri kablova IPO 13, 3×95 mm² imaju vrednost prema tabeli III.4.

Nulta impedansa kablova, naročito ako ovi nemaju zaštitnu armaturu od čeličnih traka, osetno zavisi od električne provodnosti tla i prisustva drugih provodnih masa u zemlji duž trase.

TABELA III. 4

Pogonska impedansa pri $f=50$ Hz, Ω/km			Nulta impedansa pri $f=50$ Hz, Ω/km		
r	x	z	r_0	x_0	z_0
0,184 do 0,207	0,08 do 0,12	0,206 do 0,25	1,59 do 2,43	0,56 do 1,32	1,86 do 2,51

Na sl. III.2 date su vrednosti pogonske kapacitivne odvodnosti pojedinih kablova pri $f=50$ Hz, zavisno od preseka provodnika. Navedene vrednosti važe i za nulte kapacitivne odvodnosti. Kod pojasnih kablova, izuzetno, nulti kapacitet ima za oko 40% manje vrednosti od pogonskog kapaciteta.

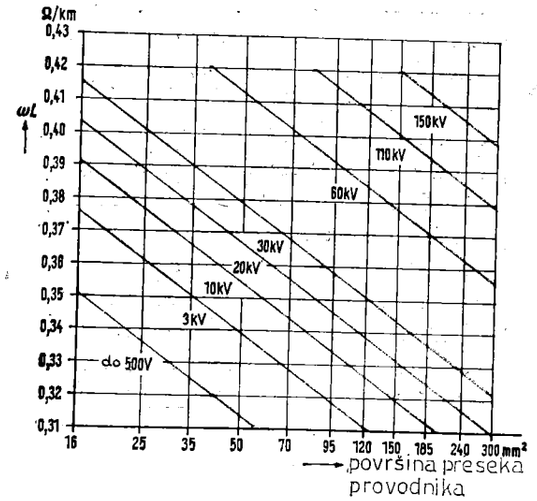


Sl. III. 2

III. 2.2 VAZDUŠNI VODOVI

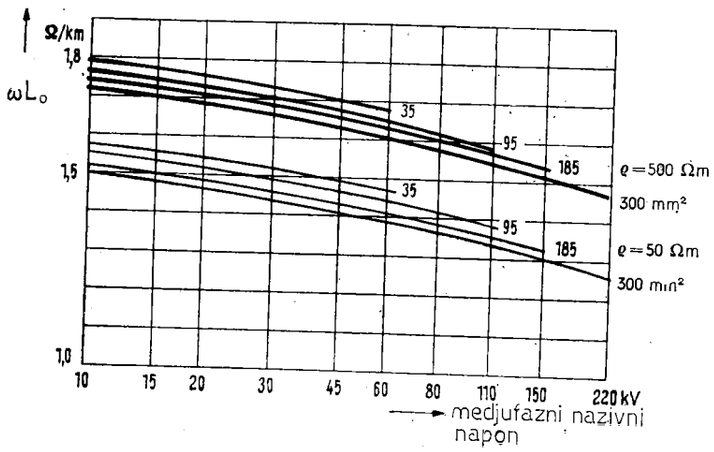
Dijagram na sl. III.3 prikazuje vrednosti pogonske reaktanse vadzušnih vodova različitih nazivnih napona u funkciji površine preseka, za $f=50$ Hz [4, 118].

Na sl. III.4 date su vrednosti nultih reaktansi vodova pri $f=50$ Hz za slučaj kada vodovi nemaju zaštitni provodnik [4, 118]. Kod zaštitne užadi od čelika nulte reaktanse su manje za 5 do 15%, a kod užadi aluminijum — čelik, za 15 do 30%.



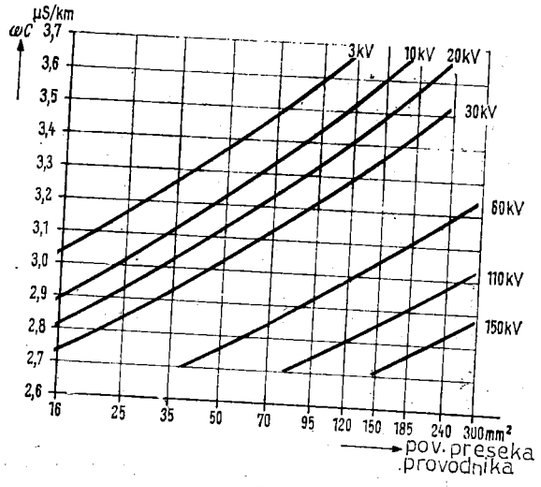
Sl. III. 3

Aktivne otpornosti za nulti redosled dobijaju se približno kada se vrednostima u Tabeli III.1 doda 0,15 Ω/km koliko iznosi trostruka vrednost otpornosti povratnog puta kroz tlo (Odeljak 5.6).



Sl. III. 4

Krive na sl. III.5 daju vrednosti pogonskih kapacitivnih odvodnosti vodova pri f=50 Hz, za različite nazivne napone, u funkciji površine poprečnog preseka provodnika [4].



Sl. III. 5

Kapacitivnosti za nulti redosled približno su 40 do 50% manje od navedenih vrednosti.

LITERATURA

1. R. Rüdenberg: Elektrische Wanderwellen (knjiga), Springer Verlag 1962.
2. R. Willheim, M. Waters: Neutral grounding in high voltage transmission (knjiga, prevod na ruski) GEI, 1959.
3. R. Rudenberg: Transient performance of electric power systems (knjiga) Mc Graw-Hill, 1950.
4. R. Roeper: Kurzschlussströme in Drehstromnetzen (knjiga) Siemens, 1970.
5. A. Hochreiner: Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen (knjiga) Springer Verlag, 1957.
6. H. Pundt: Untersuchung der Ausgleichsvorgänge bei Erdschluss in Energieversorgungsnetzen, Energietechnik 10 (1965) str. 469—477.
7. M. Golubović: Uzemljenje zvezdišta 35 i 10 kV kablovske mreže Beograda i izbor zaštitnih uređaja (elaborat) 1961.
8. W. Koch: Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV, (knjiga) Springer V. 1961.
9. R. Mesterman: Die Behandlung des Sternpunktes in stadtischen Kabelnetzen, ETZ-A 82 (1961) str. 656—668.
10. H.A. Peterson: Transients in power systems (knjiga), New York, 1966.
11. R. Kahnt, H. Korner: Niederohmige Sternpunkterdung in Mittelspannungskabelnetzen, Elektrizitätswirtschaft 67 (1968) str. 336—342.
12. K. Ruppel: Nachbildung von Erdschlüssen in Kabel kleiner Mittelspannungsnetze mit izolierten Sternpunkt, ETZ-A 90 (1969) str. 577—581.
13. K. Berger, R. Pichard: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Erdschlussüberspannungen in isolierten Wechselstromnetzen sowie der Eigenschaften von Erdschlusslichtbogen, Bulletin ASE et UCS 11 (1956).
14. H. Maier: Überspannungen bei Erdschlüssen i Hochspannungsnetzen, ETZ-A87 (1966) str. 64—70.
15. H. Baatz: Überspannungen in Energieversorgungsnetzen (knjiga), Springer Verlag, 1956.
16. H. Pundt: Einige Betrachtungen zur Sternpunktbehandlung in industriellen Mittelspannungsnetzen, Energietechnik 11 (1963) str. 488—490.
17. F.A. Lihačev: Zemljospojevi u mrežama sa izolovanim zvezdištem i kompenzacijom kapacitivnih struja (knjiga, na ruskom) Energija, 1971.
18. M. Rüger, E. Stolte: Optimale Sternpunktbehandlung in Mittelspannungsnetzen, Elektrizitätswirtschaft 21 (1970) str. 565—570.
19. VDE 0675/9.57.
20. VDE 0288/4.65.
21. VDE 0288a/7.71.
22. M. Erich, H. Heinze: Löschung von Erdschlusslichtbogen in Mittelspannungsnetzen, Elektrizitätswirtschaft 21 (1970) str. 565—570.
23. Priručnik za izučavanje pravila tehničke eksploatacije električnih stanica i mreža (knjiga, na ruskom), Energija, 1965.

24. F. Geise: Erdkurzschlüsse, Einfach — und Doppelerdschluss in Mittelspannungsnetzen, ETZ-A 75 (1954), str. 215—220.

25. Zbirka elektrotehničkih propisa (knjiga), Novi Sad, 1976.

26. Aussprache zu den Themen über Sternpunktbehandlung ETZ-A (1961) str. 678—692.

27. H.F. Wend: Petersen-Spulen oder Strombegrenzende Widerstände in Stadtnetzen, Elektrizitätswirtschaft 68 (1969) str. 741—745.

28. M. Erich, H. Zaduk: Behandlung der Sternpunktes, Art des Netzaufbaus und Betrieb von Mittelspannungsnetzen in Deutschland, Frankreich und Italien, Elektrizitätswirtschaft 68 (1969) str. 734—741.

29. Application guide on methods of neutral grounding of transmission systems, AIEE Committee report, avgust, 1953.

30. Present-day grounding practices on power systems, AIEE Committee report Vol. 66, 1947.

31. EDF: Publikacija H-80, april 1959.

32. H. Baatz: Praxis der Sternpunktbehandlung in den verschiedenen Ländern für Netze mit Betriebsspannungen von 110 kV und darunter, ETZ-A 82 (1961) str. 654—656.

33. British standar code of practice CP 1013—1965.

34. The earthing and bonding of transmission and distribution equipment, publikacija SE El. Board, 1955.

35. K.H. Feist: Erfordernisse der Erdung bei Kabel mit ausserer isolierender Schutzhülle, Elektrizitätswirtschaft 11 (1969) str. 361—364.

36. VDE 0141/ 73, predlog propisa.

37. Diskussionversammlung des VSE über die neuen Erdungsvorschriften, vom 9. Mai 1973. in Zürich, Bulletin ASEV, VSE Nr. 5 (1974).

38. O. Possner: Netzsternpunktbehandlung, AEG-Mitteilungen 56 (1966) str. 344—349.

39. H. Hergenreder: 4 Die Spannungsebenen 110 kV und 10 kV für ein Grossstadtnetz, Elektrizitätswirtschaft 21 (1971).

40. Ž. Falu: Mreže za prenos energije (knjiga, prevod sa francuskog), Naučna knjiga, Beograd 1951.

41. Pravilnik o tehničkim normativima za elektroenergetska postrojenja nazivnog napona znad 1000 V, Službeni list SFRJ br. 4 od 24. 1. 1974.

42. VDE 0141/2, 64.

43. G. Eckey, W. Trappe: Einführung der halbstarren Sternpunkterdung in ein Mittelspannungsnetz und Betriebserfahrungen, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 19 (1969) str. 73—81.

44. F. Lenz: Betrieb von Kabelnetzen mit kurzgeerdeten Sternpunkt, Elektrizitätswirtschaft 56 (1967) str. 155—158.

45. E. Ziegler: Aufbau und Typenleistung von Sternpunktbildnern, Siemens Zeitschrift 42 (1968) str. 538—544.

46. P. Simon: Schutz von Nachrichtenkabeln in stark induktiv beeinflussten Gebieten, Frequenz, Nr. 3 (1957), str. 82—86.

47. H. Lau: Die Beeinflussung von Fernmeldekabeln durch Starkstromleitungen und der Kabelreduktionsfaktor von Blei und Wellmantelkabeln, ETZ, Nr. 3 (1955), str. 153—162.

48. K.H. Feist: Erdungen in Starkstromkabelnetzen, Siemens Zeitschrift H. 9 (1962) str. 669—676.

49. H. Angel, E. Renter: Niederohmige, mittelbare Kurzerdung zur Fehlererfassung, ETZ-B 20 (1968) str. 757—759.

50. L. Zimmerl: Das Erdschlussproblem in Mittelspannungsnetzen, ÖZE 22 (1969) str. 267—272.

51. EDF: La protection des reseaux aeriens a moyenne tension, H-75, novembar 1967.

52. EDF: Transformateur sur poteau, B.82-5, oktobar 1968.

53. Elektrotehnički fakultet, Beograd: Studija zaštite od opasnih napona u niskonaponskoj mreži Beograda, Beograd, 1973.

54. Buchhold/Happoldt: Elektrische Kraftwerke und Netze (knjiga) Springer V. Berlin, 1956.

55. Energetski kablovi sa papirnom izolacijom i metalnim plaštom (prospekt), Industrija kablova Svetozarevo.

56. R. Billington i dr. Power-system reliability calculations (knjiga), MIT Press, Cambridge, 1973.

57. Naredbe o merama za zaštitu vodova elektroveza od električnih vodova izdate u Sl. listu br. 34/51, kao i o izmenama naredbe, Sl. list 6/52 i 13/60.

58. A.S. Majkopar: Spojevi sa lukom na dalekovodima (knjiga, na ruskom) »Energija«, Moskva 1965.

59. Tehnička preporuka za izbor zaštitnih uređaja u distributivnoj mreži 10 (20) kV SR Srbije, Posl. udruž. elektroprivr. preduzeća za distribuciju el. energije Srbije, Beograd, 1972.

60. T. Bojković: Primena lokalne automatike u distributivnim mrežama Srbije, JUNAKO CIGRE, Ohrid, ref. 312.15, 1972.

61. J. Hostnik: Studija ozemljitvene srednjenapetosne nevtralne tačke preko niskoohmskega upora v RTR Domžale, Inst. »M. Vidmar«, Ljubljana.

62. K. Hribšek: Uzemljenje neutralne tačke 10 (kV) mreže Elektra—Zagreb: TS UKLOPNA VII i XIV. »Iskra« — Zavod za avtomatizac. Ljubljana, 1972.

63. S.A. Uljanov: Elektromagnetni prelazni procesi (knjiga, na ruskom), »Energija«, Moskva, 1970.

64. Milosavljević Lj., Đorić N. Nulta impedansa kod kablova, II Savetovanje JUNAKO CIGRE o energetskim kablovima.

65. K. Küpfmüller: Einführung in die theoretische Elektrotechnik (knjiga), Springer V. 1968.

66. Propisi o izvođenju nadzemnih vodova, sl. 1. SFRJ, br. 51/73.

67. A.M. Zaleskij, G.A. Kukekov: Toplotni proračuni električnih aparata (knjiga, na ruskom) »Energija«, Lenjingrad, 1967.

68. A.I. Dolginov: Tehnika visokih napona (knjiga, na ruskom) »Energija«, Moskva 1968.

69. D.V. Razevig i dr.: Tehnika visokih napona (knjiga, na ruskom) GEI, Moskva 1963.

70. I. Hrs: Utjecaj otpornog uzemljenja zvezdišta na nivo unutrašnjih prenapona u razdjelnim mrežama, JUNAKO CIGRE ref. 33. 06 Bled (1977) str. 83—104.

71. J. Nahman, Lj. Gerić, A. Mozer: Analiza prenapona pri zemljospojevima u rezistantno uzemljenoj mreži na tranzijentnom modelu, JUNAKO CIGRE ref. 322.13 Budva (1975) str. 237—249.

72. A.I. Jakobs i dr.: Ocena nivoa opasnosti od el. udara i nove norme za karakteristike uzemljivača postrojenja sa velikim strujama dozemnih spojeva, »Električestvo«, Nr. 2 (1975) str. 28—33.

73. J. Nahman, I. Volčkov, sa sarad.: Izbor načina uzemljenja neutralne tačke mreže 10 kV Beograda, studija rađena za »Elektrodistribuciju—Beograd«, Beograd, 1975.

74. M.V. Kostenko: Tehnika visokih napona (knjiga, na ruskom) »Višśaja škola«, Moskva 1973.

75. H. Koettnitz, H. Pundt: Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze, Band I (knjiga) VEB, Leipzig 1973.

76. C. Barnes: Power cables (knjiga), Chapman and Hall, London 1966.

77. J. Trojak: Ispitivanje zemljospojeva u mrežama srednjeg napona (na ruskom) Zajednica Jug. elektroprivrede, 1974.

78. J. Nahman, I, Volčkov i dr.: Eksperimenti sa zemljospojem u mreži 10 kV Beograda, JUNAKO CIGRE ref. 322.15 (1975) Budva, str. 269—281.

79. Preduzeće R. Končar, Zagreb: Prijedlog preporuka za primjenu metalnih otpornika za uzemljenje zvezdišta u mrežama srednjeg napona.

80. R. Heinhold: Kabel und Leitungen für Starkstom, (knjiga) Siemens 1965.

81. AIEE Guide to Safety in AC Substation Groundings, AIEE Publ. 80 (1961).

82. C.F. Dalziel: Dangerous electric currents, AIEE Trans. El. Eng. VOL. 65 (1946), str. 579—585.

83. C.F. Dalziel: Electric shock, IEEE's spectrum, 1972.

84. U. Meier: Die Entstehung der neuen Erdungsvorschriften Bull. ASE/UCS 65 (1974) 5, str. 372—384.

85. Pravilnik o tehničkim normativima za elektroenergetska postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V, Službeni list SFRJ br. 4 (1974).

86. G. Boll: Zur Frage der Zulässigen Berührungs- — und Schrittspannungen in Anlagen über 1 kV, Elektrotechnische Zeitsch. 8 (1952) str. 253—258.

87. J. Nahman, S. Skuletich: Irregularity correction factors for mesh and step voltages of grounding grids, IEEE Summer Meeting, juli 1978.

88. A.I. Jakobs: Proračun uzemljivača pomoću digitalnog računara, Električestvo 8 (1967), Moskva str. 21—28.

89. J. Nahman: Programi EFD-1 i EFD-2 za proračun uzemljivačkih sistema, JUNAKO CIGRE ref. 322.09 Bled (1977) str. 123—137.

90. P. Laurent: Guide sur le calcul, l'exécution et la mesure des prises de terre, RGE 81 (1972) str. 455—467.

91. A.B. Oslon: Uzemljivači vazdušnih vodova i postrojenja visokog napona, (knjiga, na ruskom), Ser. »Itogi nauki i tehniki« Moskva 1966.

92. A.A. Vasiljev i dr.: Električni deo elektrana i postrojenja — II (knjiga, na ruskom) GEI Moskva 1972.

93. M.R. Najfeld: Uzemljenje, zaštitne mere elektro-bezopasnosti (knjiga, na ruskom) »Energija« Moskva 1971.

94. J. Nahman, N. Mijušković, D. Stanković: Uticaj dugih provodnika u tlu na karakteristike uzemljivača, JUNAKO CIGRE ref. 322.08 (1977) Bled str. 111—122.

95. J. Nahman: Zur digitalen Berechnung der Erdungsanlagen, Publikacije ETF Beograd 57 (1975) str. 1—14.

96. J. Nahman: An approximate analysis of earthing effects of extended conductors, Publikacije ETF Beograd 58 (1975) str. 15—21.

97, J. Nahman, I. Volčkov sa sarad.: Studija zaštite od opasnih napona u niskonaponskoj mreži Beograda, Studija ETF Beograd 1973.

98. J. Nahman: Zur Berechnung der allgemeinen Kennlinien der Erderanlagen in homogenem Erdreich, Publikacije ETF Beograd »Eletroenergetika« 48 (1974).

99. Lj. Gerić: Karakteristike prstenastih uzemljivača, JUNAKO CIGRE, ref. 22. 07 (1977) str. 93—110.

100. EDF: La protection des réseaux aériens à moyenne tension EDF, H-75te, Pariz 1967.

101. L. Gegner: Elektronisches Erdschlussrichtungsrelais TRER zur selektiven Erdschluss--erfassung, Elektrie 2 (1967) str. 50—52.

102. H. Gutman: Die fünfte Oberschwingung als vorteilhaftes Kriterium für Erdschlusserfassung in kompensierten Drehstromnetzen, Tech. Mitt. AEG-Telefunken 1 (1970).

103. M.J. Sohier: Protection des réseaux de distribution à moyenne et a basse tension d'electricite de France, Conf. de Cesky Krumlov (Čehoslovačka) 1974.

104. H. Pundt, H. Pietzsch: Auswertung der Erdschlussgeschehens in den Netzen der DDR, Energietechnik 3 (1972) str. 118—124.

105. J. Nahman: Pouzdanost distributivnih mreža sa različito uzemljenim zvezdištem, JUNAKO CIGRE ref. 322.14 (1975) Budva str. 251—267.

106. M.N. Rozanov: Pouzdanost elektroenergetskih sistema (knjiga, na ruskom), »Energija«, Moskva 1974.

107. N. Ivošević: Elektroenergetika (knjiga), Institut za n.t. dok. i inf. Beograd 1970.

108. H. Pundt: Zur Wahl der Sternpunkterdung in Mittelspannungsnetzen, Elektrie 3 (1969) str. 106—109.

109. V.A. Kozlov i dr.: Priručnik za projektovanje sistema za elektrosnabdevanje gradova (knjiga, na ruskom), »Energija«, Lenjingrad 1974.

110. J. Horvatin: Tretiranje neutralne tačke srednjenaponskih mreža, JUNAKO CIGRE ref. 42.09 Dubrovnik (1970) str. 97—105.

111. Tehničke preporuke br. 1 i br. 7, Poslovna zajednica elektrodistribucija Srbije, Beograd 1977.

112. Prenos i distribucia električne energije (priručnik) »Građevinska knjiga«, Beograd 1964.

113. M.P. Kostenko, L.M. Piotrovskii: Električne mašine II (knjiga, na ruskom) GEI, Moskva 1958.

114. P.M. Tihomirov: Proračun transformatora (knjiga, na ruskom) »Energija« Moskva 1968.

115. P. Simon: Reduktion der Starkstrom — Einwirkungen auf Nachrichtenkabel mit verschiedenartigen Mänteln, Frequenz Bd. 9, 10 (1955) str. 333—338.

116. Ch. Dalziel: Let-go currents and voltages, AIEE Transactions V. 65 (1956) str. 49—56.

117. M.G. Bodier: Mise au sol et mise a la terre des masses métalliques, Bulletin de la Société francaise des Électriciens 7 sèrie, tome I, Nr. 11 (1951), str. 684—710.

118. H. Požar: Visokonaponska rasklopna postrojenja (knjiga), »Tehnička knjiga«, Zagreb 1973.

119. VDE 0102/2, 64.

120. IEEE Guide for Safety in Substation grounding, IEEE Std 80—1976.

121. J. Nahman, S. Škuletić: Resistances to ground and mesh voltages of ground grids, Proc. IEE, Vol. 126, No. 1, January 1979 str. 57—61.